

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : **Science des Matériaux et Métallurgie**

OPTION : Science et Ingénierie des Matériaux



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention

Du

Diplôme d'Ingénieur Matériaux

CONTRIBUTION A LA VALORISATION DES DECHETS PAPIER-CARTON : PARAMETRAGE D'UNE MACHINE A BROYER POUR L'OBTENTION DU LIANT PAPIER

Présenté par : RANDRIAMALALA Helifiononana Elodie

Soutenu : 19 Septembre 2014

Rapporteurs : Monsieur RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely, Professeur Titulaire

Monsieur ANDRIAMANAMPISOA Tsiry Angelos

PROMOTION 2013



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : **Science des Matériaux et Métallurgie**

OPTION : Science et Ingénierie des Matériaux



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention

Du

Diplôme d'Ingénieur Matériaux

CONTRIBUTION A LA VALORISATION DES DECHETS PAPIER-CARTON : PARAMETRAGE D'UNE MACHINE A BROYER POUR L'OBTENTION DU LIANT PAPIER

Présenté par : RANDRIAMALALA Helifiononana Elodie

Soutenu : 19 Septembre 2014

Président du jury : Monsieur ANDRIANARY Philippe Antoine, Professeur Titulaire

Membres du jury : Docteur RANDRIANARIVELO Fréderic

Docteur RANARIVELO Michel

Docteur RAKOTOMALALA Zolimboahangy

Rapporteurs : Monsieur RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely, Professeur Titulaire

Monsieur ANDRIAMANAMPISOA Tsiry Angelos

PROMOTION 2013

REMERCIEMENTS

Ce mémoire est le fruit de mes études pendant cinq ans au sein de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo. Si cet ouvrage a été réalisé c'est grâce à DIEU tout puissant qui m'a donné la santé, la force et le courage durant mes études et surtout à la réalisation de ce travail.

C'est grâce à l'appui de plusieurs personnes et leurs soutiens que je suis maintenant à ce stade. Ainsi, j'adresse mes sincères remerciements et mon profond respect particulièrement à :

- ✓ Monsieur ANDRIANARY Philippe Antoine, Professeur Titulaire et Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo qui m'a autorisé à soutenir ce mémoire.
- ✓ Monsieur RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely, Professeur titulaire au sein du Département Science des Matériaux et Métallurgie à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo qui a bien voulu accepter de m'encadrer durant la réalisation de ce mémoire ;
- ✓ Monsieur RANDRIANARIVELO Fréderic, Maître de conférences, Chef de Département Science des Matériaux et Métallurgie de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo ;
- ✓ Monsieur RANARIVELO Michel, Maître de conférences et enseignant chercheur au sein du Département Science des Matériaux et Métallurgie de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, d'avoir accepté de faire partie des membres de jury du présent mémoire;
- ✓ Madame RAKOTOMALALA Zolimboahangy, Maître de conférences au sein du Département Science des Matériaux et Métallurgie de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo ;
- ✓ Monsieur ANDRIAMANAMPISOA Tsiry Angelos, enseignant au sein du Département Science des Matériaux et Métallurgie qui m'a fourni ce sujet de mémoire, pour ses compétences et la confiance qu'il m'a témoignée.

Je tiens aussi à remercier:

- ✓ Tous les enseignants du Département Science des Matériaux et Métallurgie de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo pour les conseils, les disponibilités, les présences et surtout les connaissances nécessaires qu'ils m'ont donnés durant les études ;
- ✓ Tous les responsables du bloc technique d'Ankatso, de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo et le Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment qui m'ont permis d'effectuer les études expérimentales pendant la réalisation de ce mémoire.

Je remercie enfin l'ensemble de ma famille, surtout mes parents, mes sœurs, mes frères et tous les amis qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES PHOTOS

LISTE DES ABREVIATIONS

AFNOR :	Association Française de la Normalisation
ASTM :	American Society for Testing and Materials
C:	Ciment
C_a:	Pâte de carton
CMC:	Composite à Matrice Céramique
CMM:	Composite à Matrice Métallique
CMO:	Composite à Matrice organique
EN :	Norme Européenne
ESPA	Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
JIRAMA :	Jiro sy Rano Malagasy
J :	Pâte de journaux
LINDO :	Linear INteractive and Discrete Optimizer
MA :	Module d'Alumine
MC :	Module de Chaux
Mf :	Module de finesse
MS :	Module de Silice
NF :	Norme Française
P :	Pâte de papier
R_t :	Résistance à la traction
R_c:	résistance à la compression
S :	Sable
SMM :	Science des Matériaux et Métallurgie
V :	Pâte de vélin

LISTES DES ANNEXES

SOMMAIRE

INTRODUCTION

INTRODUCTION GENERALE

Madagascar est classé parmi les pays le plus menacé par les dégradations environnementales et pollutions des écosystèmes terrestres. Non seulement ce pays est soumis à l'insalubrité permanente, mais la situation impacte de plus en plus sur les conditions de vie de la population. Dans un secteur de production, les déchets peuvent atteindre des milliers de tonne chaque année, essentiellement constitués des dechets ménagers parmi lesquels figurent le papier et le carton. Ainsi, l'environnement a été victime de leur abondance.

En effet, ce pays est le plus exposé à la nécessité de mettre en place une politique de traitement des déchets. Par contre, des méthodes pour produire de nouvelles ressources à partir de déchets sont diverses et nombreuses. Une idée relativement récente consiste à considérer les déchets comme une ressource à exploiter et non comme des rebuts dont il faut se débarrasser. C'est pourquoi nous avons choisi le thème de ce mémoire : « CONTRIBUTION A LA VALORISATION DES DECHETS PAPIER-CARTON : PARAMETRAGE D'UNE MACHINE A BROYER POUR L'OBTENTION DU LIANT PAPIER ». L'objectif est de réduire les déchets papier-carton, de recycler et d'extraire les matières premières à partir des déchets en les mélangeant avec du sable et du ciment pour produire le matériau appelé liant papier. Cette étude nous a amené à orienter nos recherches vers deux aspects théoriques concernant la mise en œuvre de matériau et la caractérisation de matériau.

La méthode expérimentale consiste à optimiser les différents paramètres importants dans le processus d'obtention de la pâte de papier et les proportions des différents constituants (pâte de papier, ciment, sable) afin de maitriser le meilleur processus dans la fabrication du liant papier.

Pour mieux comprendre ce mémoire, il comprend trois parties :

La première partie de ce mémoire est l'étude bibliographique qui se divise en 4 chapitres distincts :

- Le premier chapitre exposera l'origine de papier-carton, les processus d'obtention du papier, ainsi que leurs propriétés et caractéristiques ;
- Le deuxième chapitre concerne les matériaux composites et le liant papier ;
- Le troisième chapitre consiste à faire connaitre les caractérisations des matériaux
- Enfin, le quatrième chapitre est un rappel sur la notion sur la recherche opérationnelle et sur le MATLAB.

La deuxième partie sera consacrée à l'étude expérimentale :

- Le cinquième chapitre de ce mémoire détaille les différents matériels utilisés.
- Le sixième chapitre est l'étude pour la fabrication de la pâte de papier en utilisant les différents paramètres pour avoir le meilleur processus pour l'obtention de la pâte de papier ;
- Le septième chapitre est réservé à la mise en œuvre de matériau, ainsi que les essais de caractérisation du matériau obtenu afin de connaitre le meilleur matériau pour son usage dans le domaine de la construction ;
- Le huitième chapitre se rapporte sur la caractérisation du liant papier.

La dernière partie de ce mémoire abordera l'étude d'exploitation :

- Le neuvième chapitre contient les éléments caractéristiques de base de la machine à broyer et de la machine à presse utilisées dans l'étude expérimentale ;
- le dixième chapitre s'étend sur l'étude comparative du liant papier vis-à-vis des autres matériaux.

Nous terminons par une conclusion générale donnant un aperçu des résultats obtenus au cours de notre travail.

Première partie :

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1 : GENERALITES SUR LE PAPIER-CARTON

I. Historique [1]

L'histoire du papier est une des moments le plus remarquables qui soit. Sa découverte par les chinois remonte en effet à plus de 2000 ans. Le papier a longtemps été fabriqué à partir de fibres de chanvre, de lin, puis de coton. L'augmentation de sa consommation provoqua la recherche de nouvelles matières premières. C'est l'allemand keller qui a eu l'idée de presser du bois contre une meule mouillée pour en extraire la fibre (1840). La pâte de bois était née. La technologie papetière a cependant fait des pas de géant depuis cette époque, surtout au cours des 20 dernières années. Les cinq grandes étapes de la fabrication du papier demeurent toutefois inchangées.

Le papier est le support d'information avec la tradition la plus ancienne et une durabilité jusqu'ici inégalée. Par conséquent, même à l'ère des médias électroniques, le papier reste indispensable. Les procédés de fabrication du papier ont évolués du stade manuel jusqu'aux procédés de production actuels entièrement automatisés. Les différentes technologies sont parfaitement adaptées aux conditions d'utilisation les plus exigeantes de l'industrie papetière moderne.

II. Définitions [2], [3]

Le papier est une matière fabriquée à partir de fibres cellulosiques végétales et animales.il est constitué d'un réseau de fibres cellulosiques auxquelles on ajoute divers produits ou charges pour en modifier les caractéristiques.

Le terme carton désigne en général un papier rigide et plus épais. Le carton est le principal matériau qui est réalisé à partir de la matière première de base renouvelable que constitue la cellulose. Il est en général obtenu par contre collage de plusieurs couches de papier. Les techniques évoluent selon les qualités recherchées en aspect et en résistance.

III. La fibre cellulosique [4]

La cellulose est un glucide constitué d'une chaîne linéaire de molécules de D-Glucose (entre 15 et 15 000) et principal constituant des végétaux et en particulier de la paroi de leurs cellules. . Les fibres cellulosiques sont obtenues à l'origine à partir du bois mais aussi par des végétaux annuels ; elles sont soit neuves (pâtes vierges), soit issues du recyclage de papiers et cartons de récupération (pâtes recyclées).

Figure 01 : chaîne linéaire de D-glucose

Grâce à la liaison covalente existante entre les unités de glucose, la cellulose présente une résistance remarquable à la traction. D'autre part, les molécules de cellulose sont liées latéralement par des ponts hydrogène (faibles, mais nombreux) formant ainsi des fibrilles élémentaires de section de l'ordre de 3 nm à 5 nm.

IV. Structure [5], [6]

Les monomères de glucose sont liés par des liaisons bêta 1-4, conduisant à des polymères linéaires. Ces polymères s'associent par des liaisons intermoléculaires de type liaisons hydrogène, conférant ainsi une structure fibreuse à la cellulose. L'association de 6 chaines de cellulose forme un microfibrillé de cellulose. L'association de 6 microfibrilles de cellulose forme une macrofibrille et un agencement de plusieurs macrofibrilles forme ce qui est généralement appelé une fibre de cellulose.

La cellulose est un homopolymère linéaire composé de très nombreuses unités de D-Anhydroglucopyranose (AGU) reliées entre elles par des liaisons glycosidiques β-(1→4). Le motif de répétition est le dimère cellobiose. Les Anhydroglucopyranoses se trouvent en conformation chaise et possèdent 3 fonctions hydroxyles : 2 alcools secondaires (en position 2 et 3) et un alcool primaire (en position 6). Ces fonctions hydroxyles, ainsi que les liaisons glycosidiques, se situent en position équatoriale par rapport au plan du cycle ce qui entraîne donc que les hydrogènes du cycle se trouvent en position axiale.

Le degré de polymérisation diffère énormément selon l'origine de la cellulose ; sa valeur peut varier de quelques centaines à quelques dizaines de milliers.

La structure de la fibre cellulosique est représentée par la figure ci-dessous :

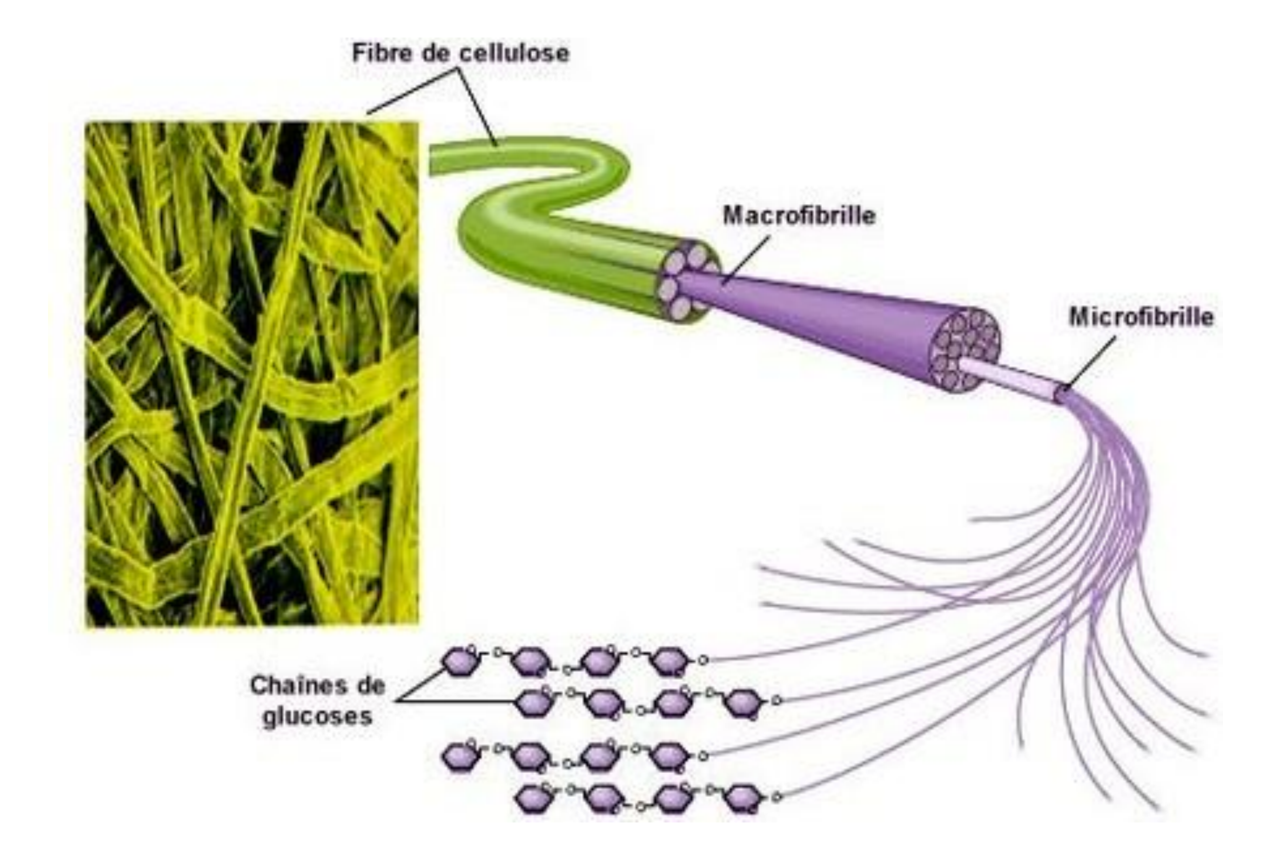


Figure 02 : les fibres cellulosiques

V. Processus d'obtention du papier et les produits en papier carton

V.1. Fabrication de la pâte à papier [2]

V.1.1 Les pâtes à papier à base de fibres vierges

Les pâtes à papier sont fabriquées à partir de bois (les pâtes issues d'autres végétaux, de bambou, d'alfa, de bagasses). Les végétaux sont constitués de fibres cellulosiques, d'hémicelluloses, de lignine et d'autres produits (résines, sels minéraux, etc…). Schématiquement, la lignine sert de liant aux fibres cellulosiques et donne sa solidité à l'ensemble. Pour faire la pâte à papier, c'est-à-dire extraire les fibres cellulosiques, on détruit les liaisons entre fibres :

- soit mécaniquement, par cisaillement du bois (pâte mécanique) ;
- soit chimiquement, par dissolution de la lignine (pâte chimique).

V.1.2 Les pâtes à papier à base de fibres de récupération

Depuis toujours, l'industrie a utilisé comme seconde matière première les papiers et cartons récupérés (dits fibres cellulosiques de récupération) pour la fabrication de la pâte à papier. Cette expression désigne un ensemble hétérogène de papiers et cartons qui ont déjà été utilisés et les chutes de transformation industrielle, à l'exclusion des cassés de fabrication. Cette matière première "secondaire" est ensuite recyclée et transformée pour produire des papiers et cartons.

V.2. Processus de la fabrication de papier [2]

Les fibres de cellulose ont la propriété de se lier entre elles ceux qui donne la solidité de la feuille.

La fabrication du papier suit le processus suivant :

- dispersion des fibres dans l'eau ;
- raffinage des fibres pour leur donner les caractéristiques désirées ;

- apport des autres constituants ;
- égouttage pour la formation de la feuille ;

- pressage et séchage ;
- traitement de surface : surfaçage, couchage...

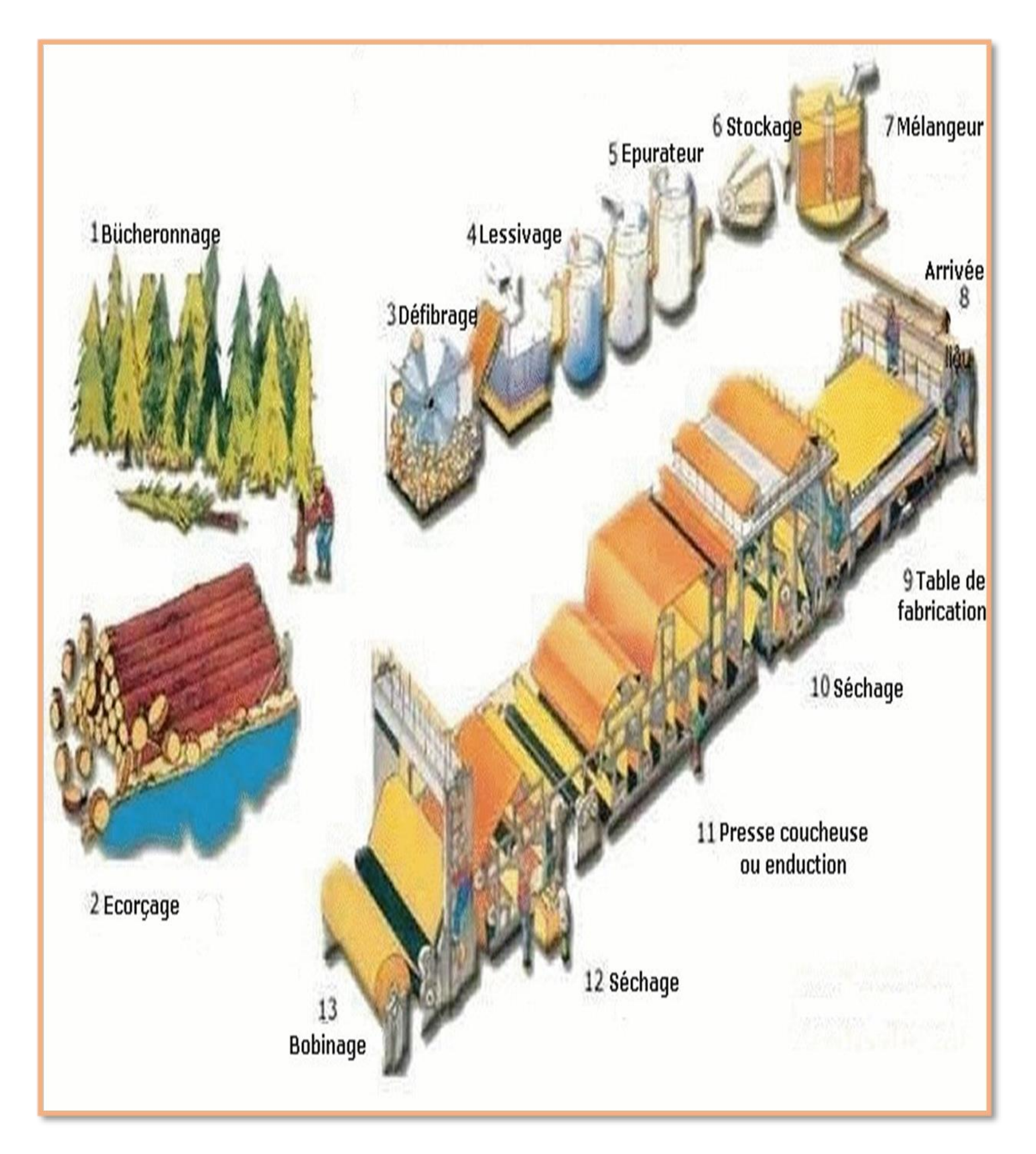


Figure 03 : processus d'obtention de papier-carton

V.3. Les propriétés et caractéristiques du papier-carton [5]

Les différentes qualités de papier sont déterminées par un ensemble de caractéristiques-clés :

Le grammage : c'est la masse d'un mètre carré de papier. Le grammage habituel est de 45 g/m^2 pour le papier journal, de 80 g/m^2 pour le papier de photocopie et de 170 g/m^2 ou plus pour le carton.

L'épaisseur: l'épaisseur du papier est mesurée en micromètres (1/1000 de millimètre). En reprenant les mêmes exemples que ci-dessus, l'épaisseur du papier journal est de 70 micromètres, elle est de 100 micromètres pour le papier de photocopie et de 200 micromètres ou 0,2 mm pour un carton de 170 g/m^2.

L'orientation des fibres: si le papier était fabriqué à la main, ses fibres seraient toutes orientées de façon aléatoire. Dans les papiers fabriqués en machines, la plupart des fibres s'orientent dans le sens longitudinal, donnant ainsi au papier des caractéristiques de raideur et de résistance différentes en longueur et en largeur.

La structure de la feuille: ce terme est employé pour rendre compte de l'homogénéité de la répartition des fibres dans le papier. Une structure homogène procurera de meilleures caractéristiques d'opacité et de stabilité ainsi qu'une meilleure aptitude à l'impression.

La rigidité : est déterminante dans l'aptitude au pliage du papier, dans une presse d'imprimerie ou dans une imprimante laser. Un formulaire plus rigide sera plus facile à plier.

La résistance à la rupture par traction: représente la force de traction maximum qu'il est possible d'appliquer à une feuille de papier sans qu'elle se déchire. Un papier ayant une résistance élevée à la rupture par traction passera mieux en machine et permettra d'adopter une vitesse d'impression plus rapide dans les presses à formulaires.

La résistance au déchirement : c'est un facteur important pour les formulaires destinés aux imprimantes dotées d'un mécanisme d'avance du papier par picots. Si la résistance au déchirement est insuffisante, la bande risque de se déchirer dans l'imprimante.

Le vieillissement: Avec le temps, les fibres de n'importe quel type de papier finissent par se vieillir. Le processus est beaucoup plus lent dans un papier fabriqué à partir de pâte chimique à pH neutre, avec adjonction d'une charge de craie ou de marbre.

V.4. Les produits en papier-carton [7]

A partir de leur usage, on distingue les différents types de papier-carton suivants :

- les papiers pour onduler à base de fibres de récupération ;
- les cartons plats (blanchis, couchés ou gris), à base de fibres neuves ou de récupération
- les papiers d'emballage (à base de pâte, de fibres vierges essentiellement, de fibres recyclée) : kraft écru ou blanchi frictionnés; papiers krafts pour sacs industriels, interkraft, papiers calandrés, papiers couchés ;
- les papiers d'impression-écriture ;
- le papier journal : un papier à usage graphique ;
- les papiers à usages sanitaires et domestiques : mouchoirs, serviettes, essuie-mains, papier hygiénique issus de fibres vierges ou recyclées.

Chapitre 2 : LES MATERIAUX COMPOSITES ET LE LIANT PAPIER

I. Les matériaux composites

I.1. Définition

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs.

Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice. Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases.

I.2. Les composants des matériaux composites

Un matériau composite est constitué d'une ossature appelée renfort qui assure la tenue mécanique et d'une protection appelée matrice qui assure la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers le renfort.

I.2.1 La matrice [8]

Dans un matériau composite, le terme matrice désigne la matière solide qui entoure les renforts pour former une masse compacte. La matrice a pour rôle de lier les renforts, répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit.

Les différents types des matrices :

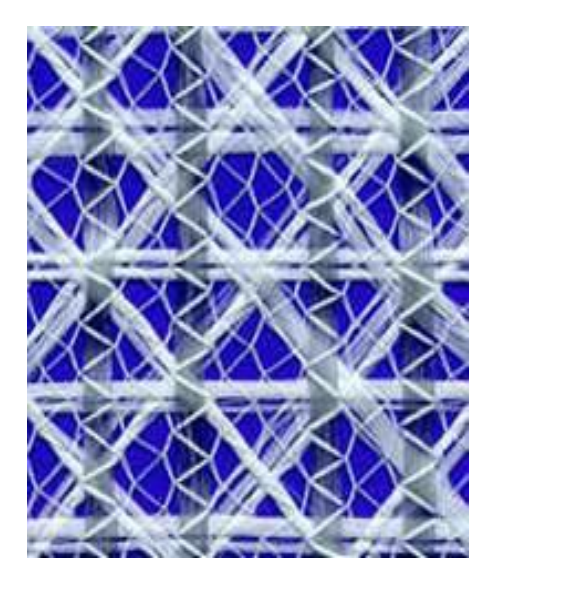
- matrice organique : Résines thermodurcissables que l'on associe à des fibres longues et polymères thermoplastiques renforcés de fibres courtes ;
- matrice métallique : comme l’aluminium, magnésium, zinc ;
- matrice céramique : la matrice peut être constituée de carbone ou de carbure de silicium.

I.2.2 Le renfort [8]

Le renfort est le squelette supportant les efforts mécaniques. Les renforts, sous forme de fibres, contribuent uniquement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés.

Les renforts peuvent être classés selon :

- leur composition : métal, verre, polymère, etc… ;
- leur forme : fibres courtes (0,1 - 1 mm), fibres longues (1 - 50 mm) ou continues (>50 mm). Les fibres continues peuvent être disposées Parallèlement les unes par rapport aux autres (renforcement unidirectionnel). Selon un angle prédéfini (45° par exemple les unes par rapport aux autres : renforcement multidirectionnelles) ;
- charges de renforcement : gravier (additionné au ciment pour fabriquer le béton), sable, billes de verre, etc… ;
- leur disposition : mat ou tissé.



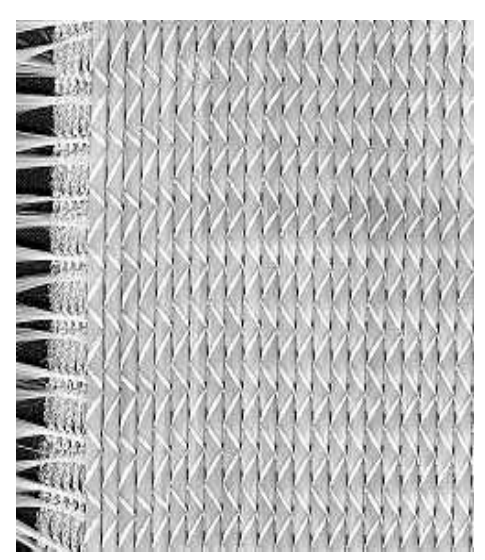


Figure 04 : fibre de renforcement multidirectionnel et unidirectionnel

I.2.3 Charges [9]

Les charges sont toute substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé.

Les substances utilisées comme charges devront d'abord satisfaire à un certain nombre d'exigences : la Compatibilité avec la résine de base (Mouillabilité ; Uniformité de qualité et de granulométrie, Faible action abrasive, Bas prix de revient).

I.3. Les principaux matériaux composites [9]

I.3.1 Les composites naturels

- le bois est un composite à base d'une matrice en lignine et de renforts en fibre de cellulose ;
- l'os est un composite à base d'une matrice en collagène et de renforts en apatite.

I.3.2 Les composites artificiels

- les matériaux rigides communément appelés "fibre de verre" et "fibre de carbone" sont des composites respectivement de fibres de verre et fibres de carbone et de diverses résines rigides (notamment époxy) ;
- le Micarta est un composite de fibre de coton ou papier imprégné à haute pression avec des résines phénoliques telles que le Bakélite ;
- les panneaux de bois agglomérés comme le contreplaqué utilisé en menuiserie, construction, ébénisterie ;
- les cloisons de Placoplatre, très utilisé dans le bâtiment hors intempéries ;
- le béton armé en génie civil est un composite de béton et d'acier ;
- le GLARE composé principalement d'aluminium et de fibre de verre est utilisé en aéronautique ;
- l'acier damassé était un composé de plusieurs feuilles d'acier de nuances différentes.

I.4. Classifications des matériaux composites selon la nature de la matrice :

- les composites à matrices organiques (CMO) qui constituent les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle ;
- les composites à matrices céramiques (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme le spatial, le nucléaire et le militaire, ainsi que le freinage (freins céramique) ;
- les composites à matrices métalliques (CMM) intéressent les concepteurs des industries automobiles, électroniques et de loisir pour leur capacité à répondre à des exigences mécaniques spécifiques.

II. le liant papier

II.1. Historique [2]

Au début des années 1990, Eric Patterson et Mike McCain, tout en travaillant indépendamment l'un de l'autre, ont l'idée de mélanger du papier avec du ciment. Eric, imprimeur de métier, a recherché comment employer tous ses déchets de papier. Il a mélangé un lot de papier et du ciment dans son mixeur de cuisine et a inventé un nouveau type de matériau. Dans le même temps Mike McCain a travaillé avec un produit très similaire. Il a mis au point un mélangeur avec un réservoir de stockage, monté à l'arrière d'une voiture auquel il a ajouté une lame de tondeuse. Il a ainsi malaxé un mélange d'eau, de papier et de ciment. Eric a construit un ajout à sa maison avec ce matériau et Mike a construit une maison pour sa mère à Columbus (États-Unis). Mike fabrique des blocs qui sont à la vente. On les utilise surtout pour la construction de maisons, l'aménagement paysager et même la réalisation d'œuvres artistiques. Le liant papier est un matériau de construction fabriqué à partir de papier-cartons recyclés, de sable et de chaux (ou de ciment).

II.2. Les compositions générales du liant papier

II.2.1 La pâte de papier

La pâte de papier constitue la matière première principale pour l'obtention du liant papier. La pâte à papier est obtenue à partir de recyclage des déchets papier-carton broyés en utilisant une machine à broyer.

II.2.2 Ciment [10]

a) Définition

Les ciments sont des liants hydrauliques : ils se combinent à l'eau en donnant des composés hydratés stables qui leur confèrent une résistance mécanique. Ils sont constitués essentiellement de silicates et aluminates de calcium. Ils sont obtenus par la cuisson à hautes températures (1400 – 500°C) de mélanges dosés de calcaire et d'argile et se présentent sous forme de poudre.

b) Les constituants du ciment

- Le clinker :

C'est le principal constituant des ciments. Le clinker est un produit obtenu par la cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkerisation) d'un mélange dosé et homogénéisé de matières qui contiennent les quatre oxydes : CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3.

- Les constituants secondaires :

Ce sont des matériaux minéraux naturels ou dérivés du processus de fabrication du clinker ou des constituants décrits dans le paragraphe ci-dessus, sauf s'ils sont déjà inclus en tant que constituants principaux. Dans tous les cas, ils entrent dans la composition des ciments dans des proportions qui n'excèdent pas 5 % en masse.

- Les additifs :

Ce sont des constituants qui ne figurent pas dans ceux énumérés ci-dessus et qui sont ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés du ciment. La quantité

totale des additifs doit être inférieure ou au plus égale à 1 % en masse (exception faite des pigments). La proportion des additifs organiques, sous forme d'extrait sec, doit être inférieure à 0,5 % en masse du ciment.

➢ Sulfate de calcium

Le sulfate de calcium, généralement du gypse ($CaSO_4$, $2H_2O$) ou de l'anhydrite ($CaSO_4$), doit être ajouté au clinker et aux autres constituants, en faible quantité (4 – 5 %) lors de la fabrication du ciment pour réguler sa prise.

➢ Les autres constituants principaux

Ils sont ajoutés au clinker, dans certaines proportions (supérieures à 5%), pour donner les différents types de ciments :

- Laitier granulé de haut fourneau – S ;
- Pouzzolanes naturelles – P ou Q ;
- Cendres volantes – V ou W ;
- Schistes calcinées – T ;
- Filler calcaire – L ;
- Fumées de silice – D.

c) Caractéristiques des ciments

➢ Compositions chimiques élémentaires

Elle renseigne sur les différents éléments chimiques présents dans le ciment. Les éléments sont déterminés sous formes d'oxydes et sous formes d'ions pour quelques rares exceptions.

On distingue :

- les quatre principaux oxydes : CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3;
- les éléments secondaires : MgO, Na_2O, K_2O, SO_3, Cl-…

Tout ciment est caractérisé par trois grandeurs : le module de chaux MC;
le module de silice MS; le module d'alumine ou module oxydique MA.

➢ Compositions minéralogiques (formule de BOGUE)

La composition minéralogique d'un clinker ou d'un ciment est l'ensemble des teneurs en constituants principaux (C_3S, C_2S, C_3A ou C_2F et C_4AF)ainsi que celles d'autres constituants du clinker de moindre importance et celles des composés introduits volontairement (constituants principaux, constituants secondaires et régulateur de prise du ciment) ou par contre accidentellement dans la composition du ciment.

La composition minéralogique est déterminante sur les propriétés hydrauliques et mécaniques des ciments, et par conséquent, sur leur mode d'utilisation. Elle peut être déduite de la composition chimique en utilisant la « formule de BOGUE ». Dans ce cas elle est dénommée composition minéralogique potentielle.

➢ Caractéristiques physiques

- Couleur

Elle varie avec la composition chimique des matières premières (particulièrement la teneur en oxydes de fer) et la nature des combustibles. Généralement elle est grise à cause des cendres des combustibles solides, mais il existe toute une gamme de coloris, et particulièrement les ciments blancs obtenus par l'utilisation de matières premières très pures et de combustibles fluides.

- Densités

Masse volumique apparente

Appelée aussi « poids au litre » du ciment, elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments inclus).

Elle est de l'ordre de 1000 Kg/m^3 en moyenne pour un ciment courant.

Masse volumique absolue ou masse spécifique

Elle représente la masse totale de tous les grains de solides contenus dans une unité de volume (vides entre les éléments exclus).

Elle varie de 2900 à 3150 Kg/m^3, suivant le type de ciment. Un ciment de faible masse spécifique ($\gamma<2900$ Kg/m^3) indique une forte concentration en produits d'addition ou une mauvaise cuisson pour son clinker.

➢ Caractéristiques mécaniques

Elles définissent la capacité d'un matériau à résister à toute sollicitation extérieure impliquant une force. La plus importante, pour les ciments, est la résistance à la compression simple. Quelque fois il y a lieu de déterminer la résistance à la traction par flexion et la résistance à l'usure.

d) Utilisation du ciment

Le tableau numéro 01 nous montre le choix d'utilisation de ciment dans différents domaines :

Tableau 01:Choix d'utilisation de ciment

TYPES	DOMAINES D'UTILISATION	EMPLOIS NON RECOMMANDES
CEM I **CEM II/A ou B** **CEM V/A ou B**	Travaux de béton en élévation ou fondation	Présence d'eaux agressives
CEM III/A, B ou C	−Travaux de béton armé souterrains − Travaux en eaux agressives − Travaux hydrauliques	− Travaux en élévation − Enduits et chapes − Ouvrages de faible épaisseur
CEM IV/A ou B	− Construction sous-marine et souterraine en béton et béton armé − Etanchéité et résistance à l'eau	− Travaux aériens − Bétonnage par temps froid
CNP	− Travaux à prise rapide : scellement, aveuglement de voies d'eau − Travaux en milieu agressif	Tout autre emploi
CA	− Doublure des appareils thermiques	− Bétonnage par temps chaud

	− Mortiers et bétons réfractaires − Bétonnage par temps froid − Pieux d'essai en béton armé	− Travaux de masse − Présence d'eau alcaline
CLX	− Travaux de maçonnerie − Présence d'eau quelque peu agressive − Travaux de génie rural − Tous travaux souterrains	− Travaux en élévation − Travaux en béton armé
CM	− Travaux de maçonnerie − Agglomérés	Travaux en béton armé
CN	− Travaux de maçonnerie − Petits travaux de bétonnage − Présence d'eau quelque peu agressive − Enduits − Agglomérés	Travaux en béton armé
(ES) **(PM)**	− Présence d'eaux agressives − Travaux de fondation à décoffrage rapide	− Présence d'eaux acides − Ouvrages soumis au gel − Mélange avec d'autres ciments
(CP)	− Travaux de béton armé souterrains − Travaux en eaux agressives − Travaux hydrauliqueS	− Travaux en élévation − Enduits et chapes − Ouvrages de faible épaisseur

Source: cours de ciment en 3ème année SIM

II.2.3 Le sable [10]

a) Définition :

Les sables sont composés de grains de roches et/ou de minéraux ayant un diamètre compris entre 0,0625 mm et 2 mm, (ou 4,75 mm, selon le système de classification utilisée). Les sables peuvent être classés dans trois plages de taille : grossier, moyen et fin.



Figure05 : le tamis

b) Caractéristiques

Les sables sont identifiés grâce à leur granulométrie (la grosseur des grains). Le sable se caractérise par sa capacité à s'écouler. Plus les grains sont ronds, plus le sable s'écoule facilement. Le sable artificiel, obtenu par découpage ou broyage mécanique de roches, est principalement composé de grains aux aspérités marquées.

On peut également différencier un sable qui a été transporté par le vent et un sable transporté par l'eau. Le premier est de forme plus ronde, sphérique, alors que le deuxième est plus ovoïde. L'aspect de la surface du grain de sable éolien est dû aux multiples impacts que subit le sable lors de son déplacement.

c) Utilisations

Le sable est l'un des principaux matériaux de construction (il entre notamment dans la composition du béton). Il constitue également la principale matière première de l'industrie du verre. Le sable est encore très utilisé en fonderie, où il est employé pour la réalisation des moulages. Le sable est également largement utilisé pour ses propriétés abrasives (cas du papier de verre recouvert de sable, par exemple). Il peut aussi être utilisé pour un décapage à la sableuse afin de nettoyer certaines surfaces (la pierre, par exemple) ou pour aplanir des surfaces de métal grossier (avec de la vapeur sous pression chargée de sable).En milieu naturel, le sable accumule des minéraux lourds alluvionnaires, permettant l'extraction de certains matériaux dont l'or, les diamants, la cassitérite (minerai d'étain), la magnétite (oxyde de fer) ou l'ilménite (oxyde de fer et de titane). L'exploitation excessive des couches de sable peut cependant conduire à une fragilisation du milieu naturel, pouvant entraîner la destruction de nappes phréatiques ou l'érosion des plages.

II.2.4 Eau

Pour convenir à la confection des matériaux (liant papier), les eaux ne doivent contenir ni composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats, ni particules en suspension dont la quantité pourrait modifier ses qualités originelles. Les eaux sont indispensables pour le mélange, mais l'utilisation en trop grande quantité nuit à la durabilité des matériaux.

L'eau a un double rôle : l'hydratation de la poudre de ciment et la facilitation de la mise en œuvre (ouvrabilité). La quantité d'eau est déterminée par les conditions de mise en œuvre.

A titre indicatif, nous donnons ci-dessous les caractéristiques de l'eau de la JIRAMA

Caractéristique de l'eau de JIRAMA :

Tableau 02:caractéristiques de l'eau de JIRAMA

Insolubles [mg/l]	0
Matières dissoutes [mg/l]	0.0034 à 0.005
Carbonates + bicarbonates alcalins [%]	0.0028
Sulfates en SO_3 [%]	0
Sulfates en S [%]	0
Sucres [%]	0
P_2O_3 [%]	0
NO_3 [%]	0
Acidité en pH	7.20 à 8.50
Acidité humique	Aucune coloration brunâtre
Chlorures [mg/L]	3.55 à 8.50
Ions soufre [%]	0

Source : JIRAMA

Chapitre 3 : CARACTERISATIONS DES MATERIAUX

I. La résistance à la compression

La caractéristique essentielle du matériau durci est la résistance mécanique en compression à un âge donné (28 jours). La connaissance de ses propriétés mécaniques est indispensable pour le calcul du dimensionnement des ouvrages. La résistance du matériau dépend d'un grand nombre de paramètres : le type et le dosage des matières premières utilisées, la condition de réalisation, la méthode d'essai utilisée (comprenant la forme des éprouvettes).



Figure 06 : mesure de la résistance à la compression

La résistance à la compression est obtenue en utilisant la formule suivante :

$$Rc = \frac{F}{S}$$

Rc : Résistance à la compression [MPa]

F : Charge maximale supportée par le matériau [N]

S : surface de matériau [mm^2]

II. La résistance en traction par flexion

La flexion est la déformation d'un objet qui se traduit par une courbure. L'essai en traction par flexion d'une poutre est un essai mécanique utilisé pour tester la résistance en traction par flexion. La résistance en traction par flexion du matériau est déterminée par chargement en trois points jusqu'à la rupture.



Figure 07 : mesure de la résistance en traction par flexion

III. La porosité :

Les matériaux réalisés à l'aide de liants hydrauliques peut être très variable et dépend en particulier du rapport eau/ciment. On définit la porosité totale par le rapport de « vide » au volume total du solide. Cette caractéristique conditionne la pénétration de l'eau au sein de la matrice solide poreuse. La caractérisation se fait après immersion pendant 72 heures du matériau .le calcul de base de la porosité est le suivant :

$$P = (M_H - M_S)*100/M_S$$

Avec

P : porosité [%]

M_H : masse du matériau humide [Kg]

M_S : masse du matériau sèche [Kg]

IV. La masse volumique :

La masse volumique d'un matériau est la masse de matériau contenue dans un volume donné. Elle est donnée par la formule ci-dessous :

$$\rho = m/v$$

ρ : masse volumique [Kg/m^3]

m : masse du matériau [Kg]

v : volume du matériau [m^3]

Chapitre 4 : NOTION SUR LA RECHERCHE OPERATIONNELLE ET LE MATLAB

I. Recherche opérationnelle [11]

L’objectif principal est d’acquérir une connaissance approfondie de certaines Techniques considérées à l’heure actuelle comme des méthodes de base en Recherche Opérationnelle. Celles-ci se retrouvent en effet, sous des formes plus complexes, dans les analyses professionnelles de faisabilité ou d’optimisation. Les exercices qui accompagnent ce cours permettent aux ´étudiants de modéliser des Problèmes simples en utilisant les techniques de la Recherche Opérationnelle.

Certaines méthodes de la Recherche Opérationnelle se démontrent au niveau mathématique assez facilement. L’algorithme du simplexe, par exemple, repose sur des arguments élémentaires de l’algèbre linéaire.

D’autres méthodes présentées, par exemple celles de la programmation dynamique, sont des cas particuliers de développements analytiques et stochastiques plus avancés, qui, à un niveau général, ne sont plus à la portée d’un ´étudiant en licence (même en mathématiques). Une justification ´élémentaire de certains cas particuliers est cependant faisable et donne lieu à quelques applications intéressantes.

D’autres méthodes encore sont purement heuristiques, comme la méthode par séparation et évaluation en programmation linéaire à valeurs entières.

Il est peut-être surprenant de constater que la presque totalité des problèmes d’optimisations énoncés (hormis ceux relevant de la programmation dynamique) peuvent être résolus à l’aide d’un algorithme de programmation linéaire. Cependant, des solutions spécifiques, par exemple au problème du flot maximal ou du flot de coût total minimal dans un réseau, sont proposées. Elles sont souvent développées à partir d’un programme linéaire adapté au problème spécifique et font partie des méthodes standards dans la littérature récente. Ainsi la question du flot de coût total minimal permet de présenter quelques éléments du simplexe des réseaux.

I.1. Définition

La recherche opérationnelle est un ensemble de techniques permettant de formaliser et de résoudre les problèmes d'organisation et de décision qui se posent dans le monde de l'entreprise.

On peut citer les problèmes de transport, de localisation d'entrepôt, de tournées de véhicule, d'emploi du temps, de gestion de stock ou de réserve énergétique (hydraulique, gaz, combustible nucléaire), mais aussi des applications particulières, telles que la conception de circuits ou de câblages, l'allocation de fréquence, etc..., qui conduisent à étudier des problèmes d'optimisation fondamentaux, souvent de nature combinatoire.

La recherche opérationnelle :

- traite un problème pratique ;
- a un objectif limité ;
- nécessite une boîte à outils (algorithmes et structures des données, optimisation combinatoire, graphes, complexité, programmations linéaire et mathématique, probabilités et statistiques,....);
- est pluridisciplinaire (Mathématique, Informatique, Economie);
- est banalisée (Programmation linéaire,...);
- aide à la décision.

I.2. Utilisation de la recherche opérationnelle :

Nous avons utilisé la recherche opérationnelle dans ce travail pour pouvoir optimiser les productions maximale et pour nous aider à la décision finale. L'analyse de la performance des différentes technologies et des appareils qui interviennent dans tous les procédés est indispensable afin d'améliorer la production. La méthode apportée dans ce travail est la méthode de tableau et le logiciel appelé LINDO en construisant un programme linéaire lié avec le processus d'obtention du liant papier.

I.2.1 Méthode de tableau :

La méthode de tableau est une méthode utilisée pour résoudre un programme linéaire. Le principe est de mettre sous forme de tableau les équations liées avec le problème.

I.2.2 Méthode par le logiciel LINDO :

LINDO est un logiciel utilisé pour résoudre les modèles d'optimisation linéaires, entiers et quadratiques. Une des caractéristiques de LINDO c'est qu'il offre des outils qui peuvent aider à l'analyse des modèles en utilisant la méthode de Simplexe.

Pour démarrer le logiciel, il suffit de cliquer deux fois sur l'icône «LINDO 6.0 for Windows » dans les programmes. Le logiciel va s'exécuter et une fenêtre s'affiche sur l'écran.

Il faut écrire le programme linéaire dans cette fenêtre. Après avoir écrit convenablement le programme linéaire à résoudre, on passe maintenant à la résolution. Pour résoudre le programme il faut cliquer sur le bouton « » dans la barre d'outils. LINDO va commencer ainsi à compiler le modèle.

S'il n'y a pas d'erreur de formulation, LINDO va commencer à résoudre le problème. Avant que LINDO nous propose un premier rapport sur la solution optimale, il nous donne l'état du problème.

Ce rapport préliminaire nous indique que :

Status : Optimal ; Il nous informe sur l'état de la solution actuelle. Elle peut être Optimal (optimale), Feasible (réalisable), Infeasible (non réalisable) ou Unbounded (non bornée).

Iterations : Il indique le nombre d'itérations nécessaire pour résoudre le problème (en utilisant la version révisée de la méthode de Simplexe).

Infeasibility : Ceci indique la quantité de violation dans les contraintes. Objective : C'est la valeur de fonction objectif relative à la solution actuelle. Best IP : N/A ; C'est la meilleure valeur de la fonction objectif. Ceci n'est vrai que pour les problèmes de type entier.

IP Bound : N/A ; C'est la borne de la fonction objectif pour cette solution. Ceci n'est vrai que pour les problèmes de type entier. Branches : N/A ; C'est le nombre de variables entiers « branched on » par LINDO. Ceci n'est vrai que pour les programmes de type entier.

Si on ferme cette fenêtre, on remarque qu'un autre rapport s'affiche. Ce rapport contient des informations sur la solution optimale.

II. MATLAB [12]

II.1. Définition

MATLAB est un langage hautes performances pour le calcul scientifique et technique. Il intègre la possibilité de calculs, de visualisation et de programmation dans un environnement très simple d'emploi. Les résultats sont exprimés sous une forme mathématique standard.



Figure08 : logo MATLAB

Le MATLAB intervienne dans diverses applications comme le :

- calcul scientifique ;
- développement d'algorithmes ;
- acquisition de données ;
- modélisation et simulation ;
- analyse de données, exploration et visualisation ;
- graphisme scientifique ;
- développement d'applications, interface graphique.

Le MATLAB permet des visualisations de données rapides et précises en 1D, 2D ou même 3D, de piloter des expérimentations, et surtout permet de réaliser facilement des programmes complexes ne nécessitant pas la reprogrammation de routines ou fonctions « classiques ».De plus, il contient également une interface graphique puissante, ainsi qu'une grande variété d'algorithmes scientifiques.

II.2. Utilisation du MATLAB

Dans ce mémoire, nous avons utilisé le MATLAB pour optimiser la caractéristique mécanique plus précisément la résistance mécanique du liant papier à 28 jours. Ainsi, il est indispensable d'utiliser la formule inspirée des études de Bolomey :

Rc_{28}=Fc*G*(C/E-0,5)

Avec R_{C28} : résistance moyenne souhaitée en (MPa),

G coefficient granulaire (densité, adhérence, dimension), à défaut de connaissance du granulat et en première approximation, on pourra adopter la valeur moyenne G = 0,50,

C : dosage en ciment en (Kg/m^3),

E : dosage en eau totale en (Kg/m^3),

Fc : classe de résistance moyenne réelle du ciment en (MPa).

Le principe est de déterminer une approximation de la formule de DREUX GORISSE en utilisant le dosage en ciment et en eau ainsi que la résistance à la compression lors des essais expérimentale. L'utilisation d'une des fonctions existantes dans le MATLAB appelée optimization permet de résoudre le problème.

Dans l'optimization il y a 6 méthodes pour la résolution du programme:

Méthode de Broyden-Fletcher-Goldfarb-Hanno ou BFGH
Méthode de Davidon-Fletcher-Powell ou DFP
Méthode de Steepest Descent
Méthode de Nelder-Mead
Méthode de Gauss-Newton
Méthode Levenberg-Marquardt

Nous n'avons utilisé que 2 méthodes : méthode de Nelder-Mead (c'est la dérivée première de la fonction qui entre dans la résolution) et méthode Levenberg-Marquardt (c'est la dérivée seconde de la fonction qui entre dans la résolution).

Ainsi, il suffit d'écrire sur le MATLAB la formule sous forme d'une programmation en utilisant ces deux méthodes pour la résolution.

Deuxième partie :

ETUDE EXPÉRIMENTALE

Chapitre 5 : LES MATERIELS UTILISES LORS DES ESSAIS

I. La machine à broyer

Le broyage est un traitement s'appliquant à des déchets solides, en général relativement friables. Ce traitement est en particulier utilisé par les industries de fabrication et transformation de papier-carton. En effet, l'utilisation de la machine à broyer est indispensable lors de la fabrication, la transformation et notamment dans le recyclage des déchets papier carton.

II. Principe de la machine à broyer :

Le broyage consiste à réduire des morceaux de matériaux solides d'une taille donnée à une taille plus petite. Le principe est la fragmentation des morceaux par l'action mécanique de pièces plus résistantes, généralement métalliques.



Photo 01 : machine à broyer

III. La machine à presse

La machine à presse est un matériel utilisé pour la confection d'éléments de construction. La présence de cette machine facilite la mise en œuvre du liant papier et permet l'obtention d'un bon matériau de construction. Le principe de la machine à presse est de comprimer la face inférieure de matériaux à l'aide d'un piston et bielle en fixant la face supérieure par l'intermédiaire d'un couvercle de même nature que le corps. La forme des matériaux dépend de la forme du moule utilisé lors de moulage.

Principe de Fonctionnement :

Le principe de fonctionnement de la machine à presse est défini par les constructeurs de la machine et ceci est basé à partir des calculs bien précis avant la conception. Lors de nos essais, nous avons utilisé une machine à presse dont les principes de fonctionnement sont les suivants : une fois que le moule est rempli par le mélange de matières premières (la pâte de papier, sable et ciment), le couvercle se ferme et le piston remonte après le glissement du levier vers l'avant et pressé jusqu'à ce que le taux de compression soit obtenu. En faisant l'inverse c'est-à-dire en amenant en arrière, le couvercle s'ouvre puis le démoulage du matériau est effectué en poussant le levier vers le bas.



Photo 02 : la machine à presse

IV. Analyseur du réseau et variateur de fréquence

IV.1. Analyseur du réseau

IV.1.1 Définition

C’est un appareil qui permet de mesurer les différents paramètres dans les réseaux éléctriques. Cet appareil est destiné aux services de contrôle et de maintenance dans les industriels ou administratifs, qui permet d’obtenir une image instantanée des principales caractéristiques de la qualité du réseau électrique par le biais d’un logiciel appelé qualistar.

IV.1.2 Les différents paramètres mesurés

Les différentes mesures effectuées sur l’appareil sont :

- mesure des tensions efficaces alternatives jusqu’à 480V (phase-neutre) ou 960V (phase-phase) pour les réseaux 2fils ; 3fils ou 4fils ;
- mesure des courants efficaces alternatifs jusqu’à 6500A ;
- mesure de la fréquence des réseaux 50Hz et 60Hz ;
- calcul du courant de neutre, par sommation vectorielle des courants de phases pour les montages en étoiles ;
- calcul du déséquilibre pour entre phase pour les courant et les tensions;
- mesure de la puissance active, réactive et apparente par phase (calcul de facteur de puissance).

IV.1.3 Logiciel d’exploitation : Le Qualistar

Ce logiciel occupe des fonctions très diverses comme le traitement des données enregistrées et des alarmes ; représentation graphique des données sous environnement Windows ; configuration complète de l’instrument ; visualisation en temps réel à l’écran des valeurs mesurées et des formes d’ondes; analyse qualitative automatique des mesures; affichage sélectif des paramètres ;rapports de mesure prédéfinis (EN 50160) ou création de nouveaux modèles; analyse des données suivant la norme EN 50160 ; transfert des impressions d’écran et des transitoires ; représentation 3D des harmoniques ; exportation des données sur tableur (Excel).



Figure 09 : analyseur du réseau

IV.1.4 Branchement d'un analyseur du réseau et utilisation

Pour le bon fonctionnement d'un analyseur du réseau, il faut brancher correctement plusieurs outils :

- les fiches des 3 fils de courants colorés en rouge sont branchées sur le boitier en jaune et les autres s'attachent à l'alimentation de la machine à broyer (ces fils déterminent le sens du courant) ;
- les fiches de 4 fils de tension colorés en rouge, vert, jaune et bleu sont reliées aussi avec le boitier tandis que les 4 pinces crocodiles sont branchés avec le variateur de vitesse ;
- pour démarrer un analyseur du réseau, il suffit de pousser le bouton vert sur le boitier après le branchement d'un fil d'alimentation ;
- un fil est disponible pour transférer les données enregistrées dans l'analyseur du réseau vers l'ordinateur ;
- dans ce mémoire, l'analyseur du réseau permet de déterminer les puissances consommées et le temps de broyage de la machine à broyer.

IV.2. Variateur de fréquence :

Un certain nombre d'applications demandent une adaptation du couple, de la vitesse, de l'accélération ou d'autres grandeurs pour une conduite satisfaisante du procédé : démarrage progressif du procédé, accélération et décélération contrôlée ; contrôle précis du couple, de la vitesse en régime statique et/ou dynamique ; réglage et asservissement des flux de production à la demande.

IV.2.1 Définition

Le variateur de fréquence est un système d'entraînement à vitesse variable, doté d'une technologie de pointe, destiné aux moteurs à induction triphasés. Conçu pour fonctionner sur des cycles d'utilisation normaux ou intensifs, il permet de répondre à une large gamme d'applications. Son excellente performance offre une productivité accrue et améliore la qualité du processus dans lequel il est utilisé. L'alimentation à fréquence variable des machines asynchrones se fait à l'aide d'un convertisseur statique généralement continu-alternatif. La source d'entrée peut être du type source de courant ou du type source de tension. En sortie du convertisseur, on contrôle l'amplitude des tensions ou des courants statoriques ainsi que leur fréquence.

IV.2.2 Principe :

Dans un moteur à courant alternatif, la vitesse mécanique du rotor est liée à la fréquence des courants au stator par la formule :

$$f=n*p$$

Avec f : fréquence [Hz]

n : vitesse de rotation [Tr/min]

p : nombre de pole

Ce lien rend possible une commande de la vitesse du rotor par la commande de la fréquence du courant au stator. Ainsi, il existe une relation directe entre le pilotage de la fréquence du courant au stator et la vitesse mécanique du rotor qui permet, pour toute vitesse mécanique souhaitée, de fixer la fréquence statorique correspondante.

C'est sur ce principe que se base le fonctionnement du variateur de vitesse : commander une vitesse de rotation mécanique en commandant la fréquence du courant statorique.



Figure 10 : variateur de vitesse

Chapitre 6 : LES MATERIAUX D'EXPERIMENTATION

I. La pâte de papier

Le traitement des déchets a longtemps été une action naturelle des populations. Les résidus d'artisanats étaient récupérés (métaux refondus, vieux chiffons, papier carton,…). Dans notre cas les matières premières utilisées pour obtenir la pâte de papier sont des déchets de papier carton.

La pâte de papier est l'un des matières premières pour l'obtention du liant papier. Il faut bien maîtriser les processus d'obtention de la pâte de papier afin d'améliorer sa finesse et son uniformité. Ainsi, le processus dépend de plusieurs paramètres bien définis et bien précis.

I.1. Les différents paramètres à respecter :

Les processus industriels nécessitent des paramètres bien définis afin de connaitre les différents aspects et caractéristiques des produits obtenus. Nos essais demandent la précision de plusieurs paramètres dans le but de maitriser le processus d'obtention de la pâte de papier. La finesse de la pâte de papier dépend des différents paramètres utilisés tels que :

- les types de papiers ;
- la quantité de papier ;
- la quantité d'eau ;
- le temps de broyage ;
- la vitesse de rotation ;
- les types de pales ;
- le temps de mouillage ;
- le déchiquetage.

I.1.1 Les types de papiers :

Les différents types des déchets de papier carton utilisés lors des essais sont : le papier journaux; le papier vélin et le carton.

I.1.2 Les types de pales :

Nous avons utilisé 3 pales différents dont l'angle d'inclinaison de la lame du rotor est : pale1 (45°) ; pale2 (60°) et pale3 (90°). Lors des essais préparatifs, l'un d'entre eux est plus avantageux du point de vue économique c'est-à-dire les données enregistrées (puissance, temps de broyage) lors des essais en charge montrent la rentabilité de l'un des 3 pales sur les énergies consommées. Le choix de la pale est alors dépendant de la puissance et du temps pendant le broyage des déchets papier carton.

Nous fixons le temps de broyage et l'utilisation d'un analyseur de réseau permet de déterminer la puissance consommée lorsque nous avons effectué les essais en charge au Bloc Technique.

On sait que :

$$W=P*t$$

Avec W : énergie [Wh] ; P : puissance [W] ; T : temps [heure]

Les puissances, le temps et l'énergie consommée pendant le broyage du papier journaux à chaque type de pale sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 03 : les puissances, temps et énergie lors du broyage du papier journaux

n° de pales	Puissance [W]	Temps [min]	Energie [Wh]
pale1	3643	6	364,3
pale2	3725	6	372,5
pale3	2359	6	235,9

Source : Auteur

D'après l'analyse de ce tableau, il est évident que nous avons opté pour l'utilisation de la pale numéro 3 lors des essais car elle utilise moins d'énergie par rapport aux deux autres pales.

I.1.3 La quantité de papier et de l'eau:

Ce sont des paramètres très importants dans les processus. Dans les essais préparatifs, la pâte s'écoule à 21 litre d'eau pour 1kg de papier-carton sec. Ainsi, nous adoptons le ratio 21litre pour 1Kg pour le broyage.

I.1.4 La vitesse de rotation :

Nous adoptons 2 fréquences différentes (50Hz ; 25-50Hz).

I.1.5 Le temps de broyage :

La détermination du temps de broyage se fait à partir des données enregistrées dans l'analyseur de réseau. Les courbes ci-dessous permettent de préciser le temps de broyage de chaque type de papier.

Papier journaux :

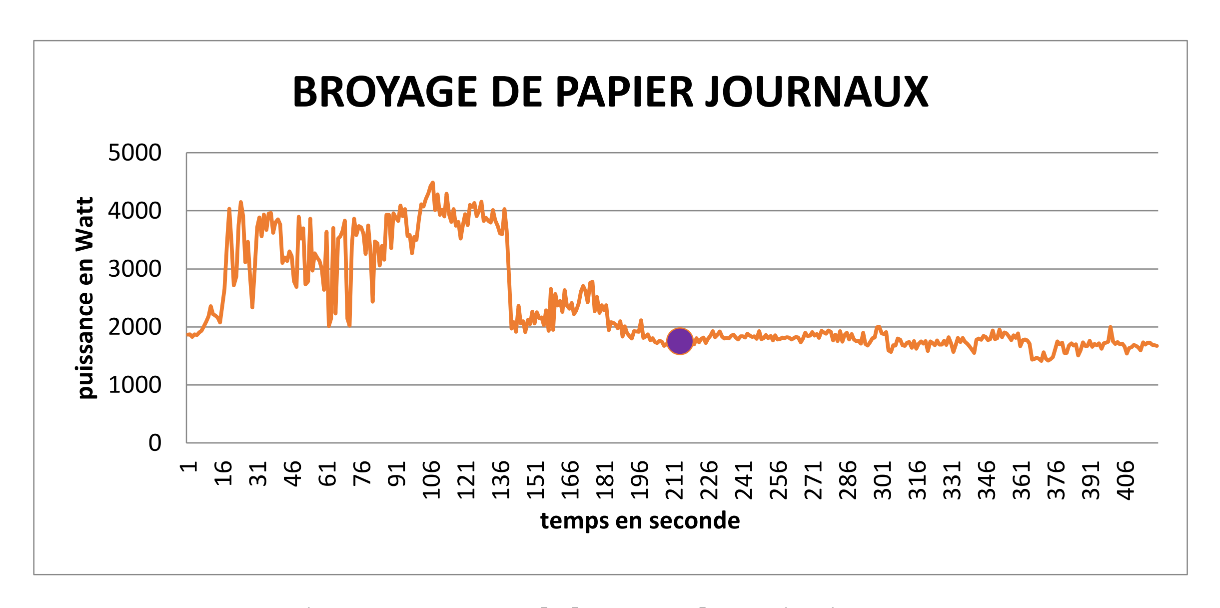


Figure 11 : temps de broyage de papier journaux

Le papier journaux est broyé à 211 secondes c'est-à-dire à 3,5 minutes.

Le papier vélin :

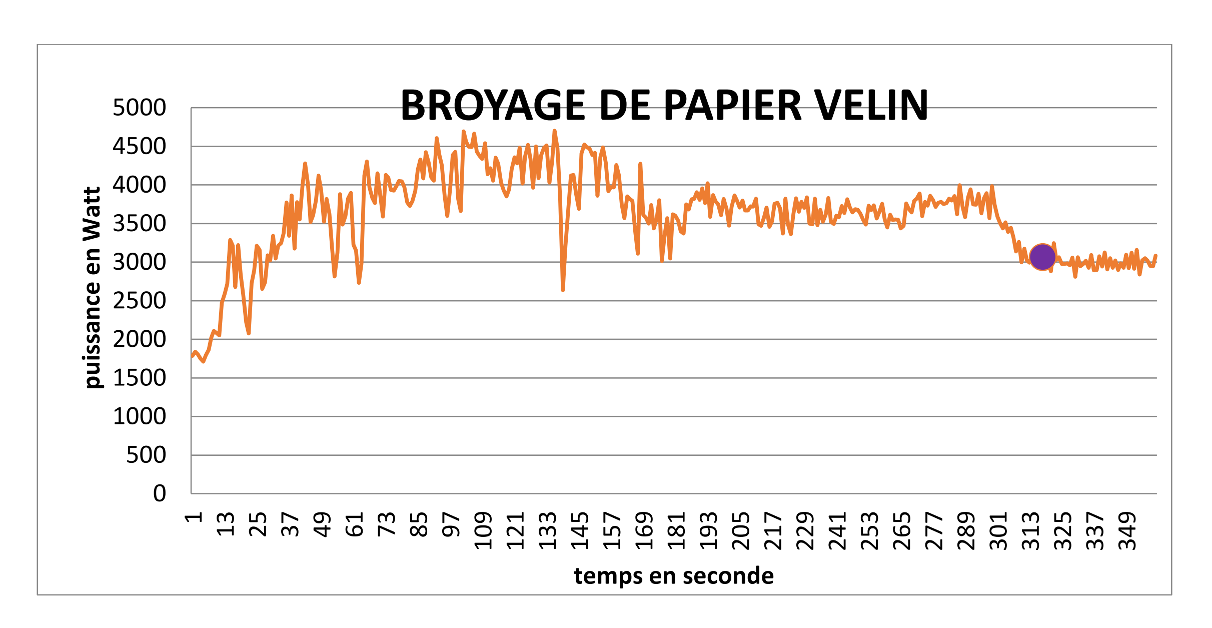


Figure 12 : temps de broyage de papier vélin

Le broyage est stable à 313 secondes c'est-à-dire 5,2 minutes.

Le carton

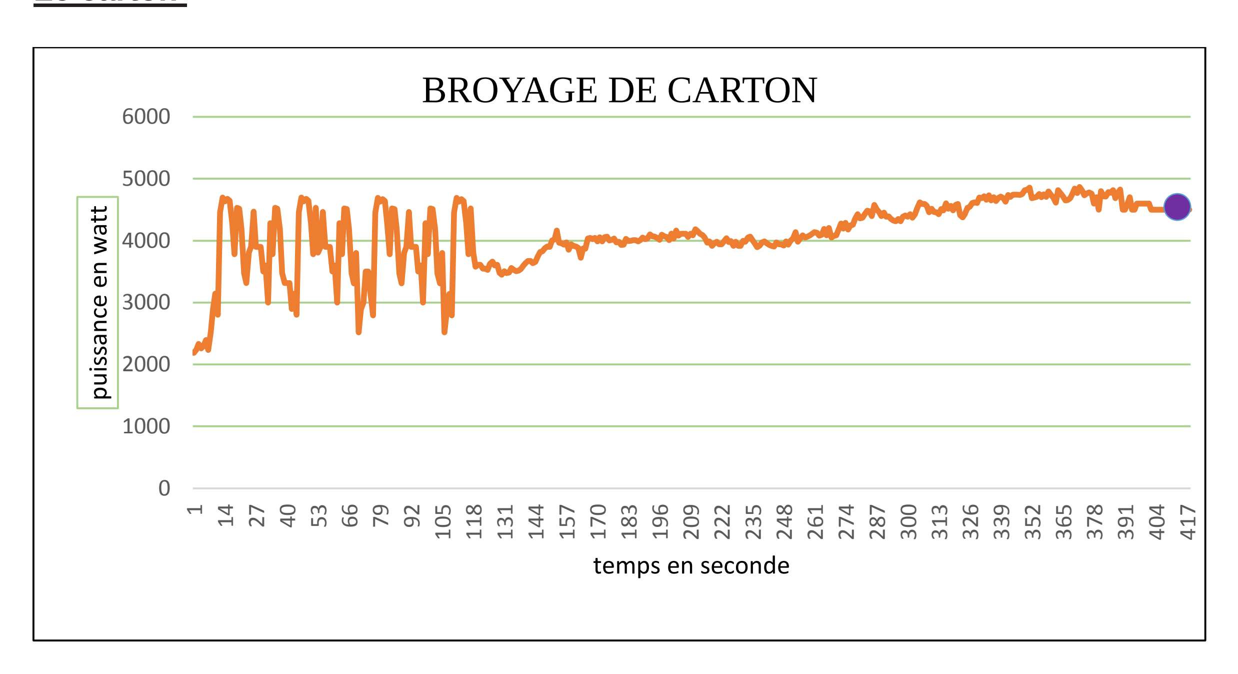


Figure 13 : temps de broyage de carton

Le carton est broyé à 406 secondes qui est de 6,7minutes.

I.1.6 Le temps de mouillage de papier:

Le temps de mouillage est l'un des paramètres qu'il ne faut pas négliger. Lors des essais, nous avons choisi 0 heure et 3 heures pour mouiller le papier avant de le broyer.

I.1.7 Déchiquetage :

Lors des essais préparatifs, nous avons broyé directement 1 Kg des déchets papier-carton (non déchiqueter). Les résultats nous montrent que 86,8% des déchets ne sont pas broyés. Après, nous avons découpé les déchets papier-carton pour déterminer le broyage optimal.

I.2. Le processus d'obtention de la pâte du papier :

La figure ci-dessous montre l'organigramme du processus d'obtention de la pâte de papier

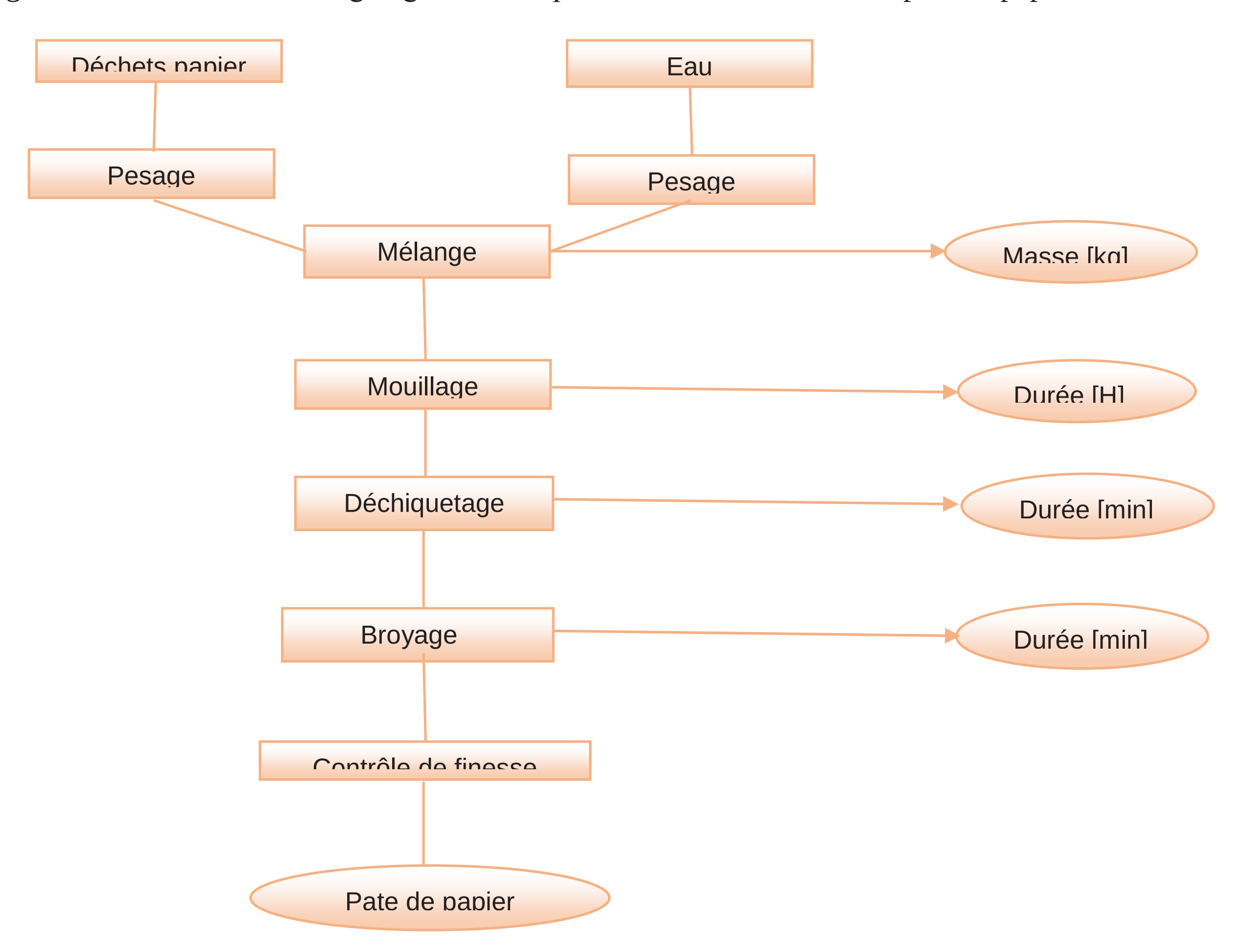


Figure 14: processus d'obtention de la pâte de papier

I.3. Les essais pour l'obtention de la pâte à papier:

Nous avons effectué plusieurs essais en faisant varier les différents paramètres tels que les types de papiers, la quantité de papier, le déchiquetage, mouillage et le temps de broyage. Le but est d'avoir des données scientifiques qui permettent de définir le meilleur processus pour l'obtention de la pâte de papier.

Mode opératoire :

- installer les appareils de mesure et brancher tous les câbles ;
- vérifier le sens de rotation du rotor ;
- démarrer la machine à broyer avant d'ajouter de l'eau et du papier ;
- verser de l'eau dans la cuve ;
- verser le papier dans la cuve ;
- effectuer le broyage en adoptant le temps de broyage ;
- varier la vitesse en utilisant un variateur de fréquence ;
- enregistrer les données par l'intermédiaire de l'analyseur du réseau ;
- effectuer la vidange.

Le tableau suivant montre les différents essais effectués lors de la production de la pâte de papier :

Tableau 04:les différents essais effectués

N° des essais	type de papier	vitesse [Tr/min]	temps de broyage [min]	temps de mouillage [Heure]	Déchiquetage [cm^2]	quantité d'eau [L]	quantité de papier [Kg]
Essai01	Papier journaux	50	4	0	1	21	1
Essai02		50	4	3	1	21	1
Essai03		25-50	4	0	1	21	1
Essai04		25-50	4	3	1	21	1
Essai05		50	4	0	4	21	1
Essai06		50	4	3	4	21	1
Essai07		25-50	4	0	4	21	1
Essai08		25-50	4	3	4	21	1
Essai09	Carton	50	7	0	1	21	1
Essai10		50	7	3	1	21	1
Essai11		25-50	7	0	1	21	1
Essai12		25-50	7	3	1	21	1
Essai13		50	7	0	4	21	1
Essai14		50	7	3	4	21	1
Essai15		25-50	7	0	4	21	1
Essai16		25-50	7	3	4	21	1
Essai17	papier vélin	50	6	0	1	21	1
Essai18		50	6	3	1	21	1
Essai19		25-50	6	0	1	21	1
Essai20		25-50	6	3	1	21	1

Source : Auteur

Le meilleur processus pour l'obtention de la pâte de papier est basé sur la connaissance de la puissance consommée et le temps pendant le broyage des déchets papier-carton. Nous avons mesuré la puissance consommée lors du broyage des déchets pendant un temps donné. La détermination de l'énergie peut être déterminée par sa relation entre la puissance et le temps.

Le tableau ci-dessous résume l'énergie consommée par type d'essai et le papier non broyé pendant le broyage :

Tableau 05 : résultats de mesures des énergies consommées lors des essais

type de papier	Essais	temps de broyage [min]	puissance consommée [W]	Energie [Wh]	papier non broyé [g]
papier journaux	essai1	4	2818,49	187,9	10
	essai2	4	2193,54	146,236	0
	essai3	4	1232,69	82,179333	252
	essai4	4	1290	86	126
	essai5	4	1750,1	116,67333	1220
	essai6	4	1585,5	105,7	396
	essai7	4	951,9	63,46	1434
	essai8	4	1560,49	104,03267	263
Carton	essai9	7	3030,88	353,60267	246
	essai10	7	4160,64	485,408	20
	essai11	7	2252,69	262,81383	465
	essai12	7	2002,5	233,625	320
	essai13	7	1953,02	227,85233	612
	essai14	7	3103,6	362,08667	222
	essai15	7	1528,23	178,2935	1094
	essai16	7	1283	149,68333	645
papier vélin	essai17	6	3000,119	300,0119	115
	essai18	6	2600,12	260,012	12
	essai19	6	1850,5	185,05	433
	essai20	6	1720,4	172,04	228

Source: Auteur

I.4. Interprétation :

D'après l'analyse de ce tableau, nous pouvons affirmer que le mouillage est un paramètre important dans les processus. La dernière colonne du tableau numéro 3 indique la masse de papier-carton non broyée lors des essais. Celle-ci est due à la diminution de la performance de la machine lorsque nous ajoutons le papier sec.

Nous avons vu aussi que le broyage de papier-carton sec consomme plus d'énergie par rapport au papier-carton mouillé. Il faut humidifier les déchets papier-carton à 3 heures de temps afin d'avoir un processus optimal pour l'obtention de la pâte de papier.

Nous avons constaté que les déchets papier-carton broyés peuvent atteindre jusqu'à 100% si la surface du papier-carton après le déchiquetage est inférieur à la surface entre les distances de deux lames du rotor. Certains essais sont interrompus lors du broyage car la machine ne supporte pas les charges de 2kg de déchets déchiquetés à $4cm^2$. Ainsi, il est préférable de déchiqueter le papier à une dimension moindre ($1cm^2$) avant de le broyer. La pâte à papier est obtenue facilement lorsque la machine tourne à la vitesse maximale (1500Tr/min) c'est-à-dire à fréquence 50Hz.Le papier journaux est le plus facile à broyer, puis le papier vélin et enfin le carton car le broyage dépend du grammage (g/cm^2) de chaque type de déchets. Si le grammage est petit, le broyeur broie les déchets facilement. Ainsi, il y a un gain de temps et d'énergie consommée.

I.5. Détermination de la masse volumique de la pâte à papier :

La masse volumique de la pâte à papier à base de papier journaux, papier vélin et carton est différente car celle-ci dépend de la masse volumique de chaque type de papier. Il faut extraire les excès d'eau dans la pâte de papier car nous avons adopté le ratio 3litre d'eau et 1kg de papier-carton pour fabriquer le liant papier. Nous avons conçu un tamis pour extraire les excès d'eau (18litre pendant 96 heures en utilisant le poids propre de la pâte de papier) dans la pâte de papier. En adoptant ce ratio 1 sur 3, nous avons environ 4kg de pâte de papier et le calcul de sa masse volumique est basé sur ce ratio.

La masse volumique de la pâte est déterminée à partir de la formule :

$M_p = \rho_p * V_p$

M_p : masse de la pâte de papier

ρ_p : masse volumique de la pâte de papier

V_p : volume de la pâte de papier

Avec $V_p = V_{papier} + V_{eau}$

Or : $P_{papier} = \frac{Mpapier}{\rho papier}$ et $V_{eau} = \frac{Meau}{\rho eau}$

<u>Masse volumique de la pâte de papier journaux :</u>

$\rho_{\text{pâte journaux}} = 4 / ((1/642,86) + 3/1000)$

$\rho_{\text{pâte journaux}} = 878\ Kg/m^3$

<u>Masse volumique de la pâte de papier vélin :</u>

$P_{\text{pate vélin}} = 4 / ((1/720) + 3/1000)$

$\rho_{\text{pâte vélin}} = 910\ Kg/m^3$

<u>Masse volumique de la pâte de carton</u> :

$\rho_{\text{pâte carton}} = 4 / ((1/850) + 3/1000)$

$\rho_{\text{pâte carton}} = 958 Kg/m^3$

II. Le ciment :

Nous avons utilisé un ciment portland CEM I 42,5N dans la fabrication du liant papier. Les essais de caractérisation de ciment au laboratoire donnent la composition chimique, la composition minéralogique en pourcentage massique, ainsi que ses caractéristiques physiques.

II.1. Caractéristiques chimiques :

Les résultats des caractéristiques chimiques du ciment sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 06 : résultats des caractéristiques chimiques du ciment

Eléments	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO
teneur en [%]	20,2	5,8	3,1	62,21

Source : Auteur

Modules du ciment:

D'après le tableau ci-dessus, nous avons pu déterminer le module d'alumine, le module de silice et le module de chaux du ciment :

Module d'alumine :

MA = 1,87

Module de silice :

MS = 2,27

Module de chaux :

MC = 92,57

II.2. Composition minéralogique de ciment :

La composition minéralogique du ciment est donnée par le tableau 06 suivant :

Tableau 07:Composition minéralogique du ciment

Eléments	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
teneur en [%]	56,06	15,93	10,13	9,42

Source : Auteur

II.3. Caractéristiques physique :

Le tableau numéro 08 donne les caractéristiques physiques du ciment :

Tableau 08 : les caractéristiques physiques du ciment

Couleur	Gris
Masse volumique apparente [kg/m3]	1000
Masse spécifique [kg/m3]	3120
Début de prise [mn]	226
Fin de prise [mn]	306
Surface spécifique Blaine [g/cm2]	1,5
Stabilité [mm]	3650

Source : Auteur

III. Le sable

III.1. Analyses granulométriques (Norme AFNOR)

L'analyse granulométrique est l'opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille,...). Elle permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Les matériels nécessaire lors de notre essai sont des tamis d'ouverture (en mm: 4 ; 2,5 ; 1,6 ; 0,5 ; 0,4 ; 0,25 ; 0,2 ; 0,1 ; 0,08) et d'une balance de précision.

III.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituants l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le sable étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

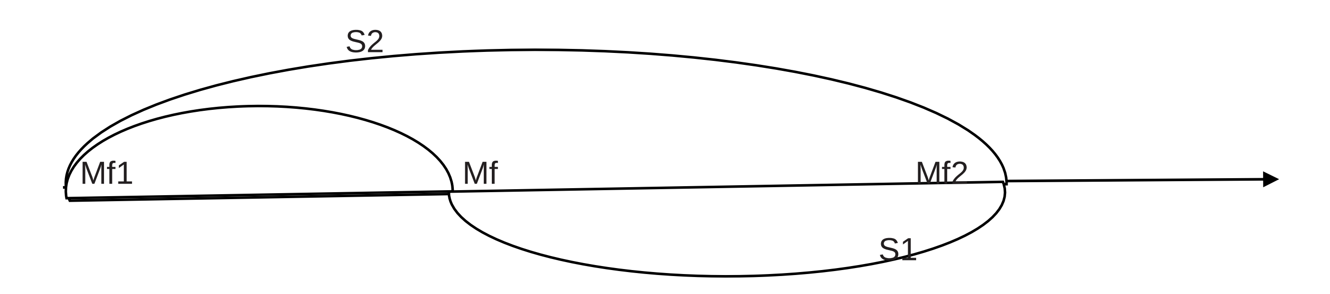


Figure 15 : tamisage du sable

III.3. Module de finesse

Un bon sable doit avoir un module de finesse entre 2,2 et 2,8. La valeur moyenne Mf=2,5 est une valeur optimale du module de finesse. Le module de finesse du sable est obtenu à partir de la formule suivant :Mf = ∑ (refus)/100

Lors de notre essai, nous avons utilisé deux sables de rivières de module de finesse différent. L'analyse granulométrique et le calcul du module de finesse du sable S1 et du sable S2 nous donne, Mf1=1,725 et Mf2 = 2,87. Les modules de finesse Mf1 et Mf2 est différent de Mf (Mf1est inférieur à 2,2 et Mf2 est supérieur à 2,8). Les deux sables sont inappropriés pour la fabrication des matériaux. Cependant, nous pouvons corriger ces deux granulats en les mélangeant pour avoir un module de finesse Mf=2,5. La méthode utilisée pour déterminer la proportion des deux sables est la méthode des segments inverses :



Pourcentage de sable 1

$$\%S1= \frac{Mf2-Mf}{Mf2-Mf1} * 100$$

Pourcentage de sable 2

$$\%S2=\frac{Mf-Mf1}{Mf2-Mf1} *100$$

S1 = 32, 29%; S2 = 67, 71%

Donc, nous déduisons le passant cumulé et la courbe granulométrique du nouveau sable de module de finesse 2,5.

L'analyse granulométrique du sable S3 après mélange de sable S1 et S2 est résumée dans le tableau numéro 09:

Tableau 09 : passant cumulé du sable S3 après la correction granulométrique

MODULE DE TAMIS	TAMISAT CUMULE [%]
20	0
21	0,8
24	4,6
25	9, 9
27	29,4
28	38,6
33	91,2
35	96,8
37	100

Source : Auteur

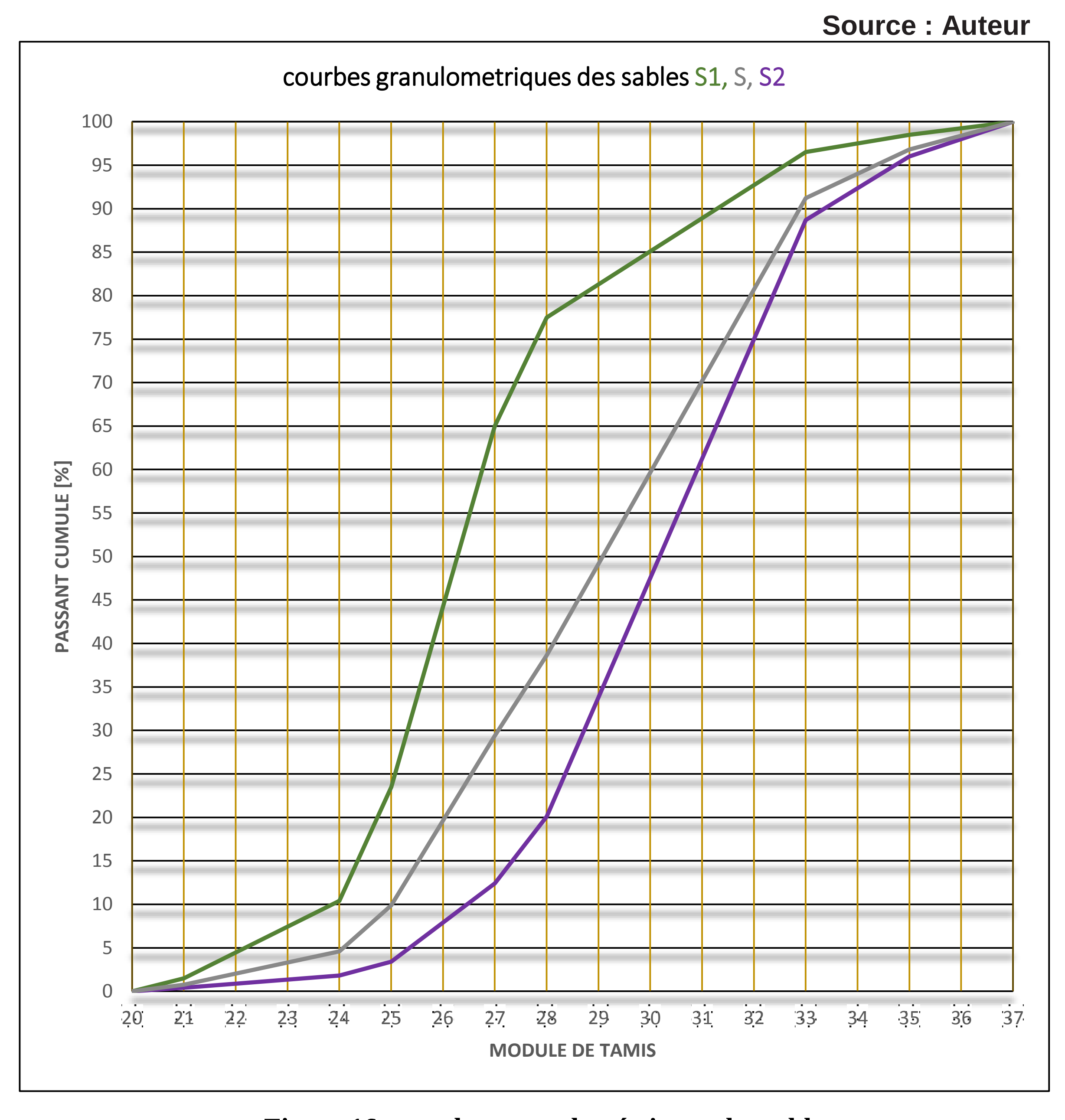


Figure 16 : courbes granulométriques des sables

IV. Eau

Lors de nos essais, nous utilisons l'eau de JIRAMA pour le broyage des déchets papier-carton. L'eau dans la pâte de papier après l'extraction d'excès d'eau en adoptant le ratio 1Kg des déchets papier-carton pour 3 litre d'eau contribue à l'hydratation de la poudre de ciment et la facilitation de la mise en œuvre (ouvrabilité).

Chapitre 7 : LE MATERIAU LIANT PAPIER

Le but de ce chapitre est la mise en œuvre du liant papier en mélangeant 3 matières premières : la pâte à papier, le ciment et le sable. Nous avons utilisé 3 types de pâte de papier (pâte papier journaux, pâte papier vélin et pâte carton), le ciment CEM I 42,5N et du sable pour fabriquer le matériau. Le liant papier est donc un matériau composite car il est composé de trois matériaux différents non miscibles.

I. Les différentes compositions utilisées :

Nous avons adopté pour notre travail les compositions du liant papier suivantes pour pouvoir déterminer les meilleures proportions du mélange. L'alphabet P, S, C indique la pâte de papier, sable et ciment et J, V, C_a indique la pâte de papier journaux, la pâte de papier vélin et la pâte de carton. Les chiffres donnent le pourcentage des matières premières et le numéro du liant papier.

II. Mode opératoire :

Après le broyage des déchets papier carton, c'est la mise en œuvre du liant papier l'étape suivante. Nous avons adopté le ratio 1Kg de papier et 3 litre d'eau (environ 4kg de pâte de papier) pour faciliter la mise en œuvre du matériau. Les étapes de la confection d'une éprouvette (230*200*100 mm) se fait comme suit :

- **Pesage :** peser les quantités nécessaires des différents matériaux : Extraire les excès d'eau dans la pâte de papier puis peser le ciment, le sable et la pâte de papier suivant les différentes proportions du liant papier ;
- **malaxage :** il faut malaxer les trois matériaux pendant deux minutes environ jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène et bien mouillée ;
- **remplissage du moule :** remplir le moule en ajoutant le mélange issu du malaxage;
- **pressage (taux de compression=1,5)** : le pressage se fait manuellement à l'aide d'une machine à presse ;
- **démoulage** ;
- **séchage :** le liant papier nécessite 28 jours pour sécher.

III. Processus d'obtention du liant papier :

Le processus d'obtention du liant papier est résumé par l'organigramme ci-dessous

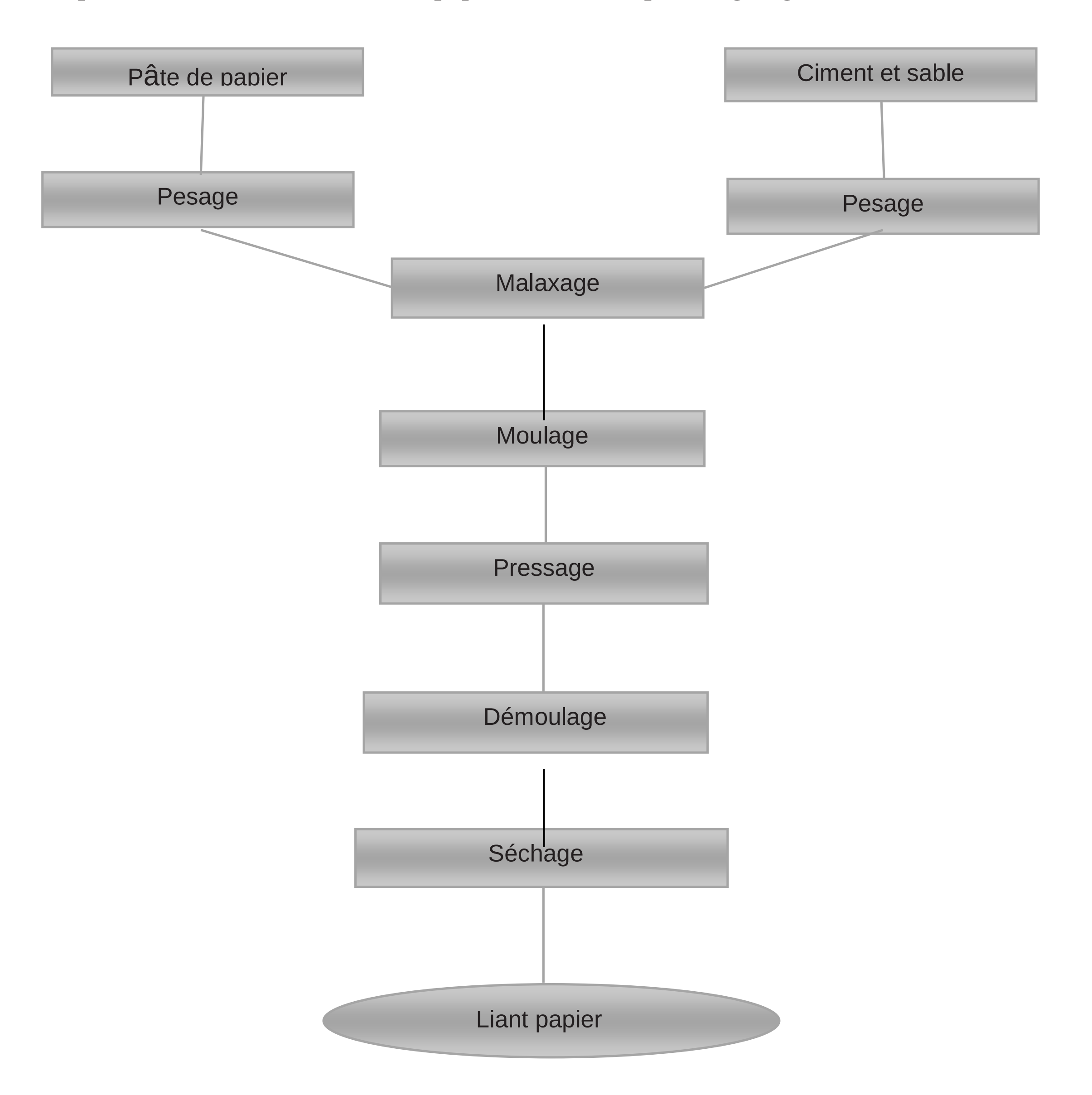


Figure 17:Processus d'obtention du liant papier

IV. La mise en œuvre du liant papier :

Nous avons confectionné plusieurs types de liant papier pour pouvoir déterminer les différentes caractérisations essentielles dans notre étude. Nous avons introduit 3 paramètres importants dans le processus d'obtention du liant papier comme la quantité de ciment, la quantité de sable et la quantité de la pâte de papier.

Le tableau ci-dessous récapitule tous les types de liant papier fabriqués lors des essais :

Tableau 10: types de liant papier confectionnés

Désignation	Pate de papier [%]	Sable [%]	Ciment [%]
P95S0C5	95	0	5
P90S5C5	90	5	5
P85S10C5	85	10	5
P80S15C5	80	15	5
P75S20C5	75	20	5
P70S25C5	70	25	5
P65S30C5	65	30	5
P60S35C5	60	35	5
P80S20C0	80	20	0
P75S20C1	75	20	5
P70S20C2	70	20	10
P65S20C3	65	20	15
P60S20C4	60	20	20
P90S0C10	90	0	10
P85S5C10	85	5	10
P80S10C10	80	10	10
P75S15C10	75	15	10
P70S20C10	70	20	10
P65S25C10	65	25	10
P60S30C10	60	30	10

Source : Auteur

Chapitre 8 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

I. Variation de la résistance à la compression en fonction du processus d'obtention de la pâte de papier :

Le tableau numéro 11 et La figure numéro 18 montre la variation de la résistance à la compression en fonction du processus d'obtention de la pâte de papier journaux :

Tableau 11: variation de la résistance à la compression en fonction du processus d'obtention de la pâte de journaux

Liant papier	N° des essais	Rc [MPa]
P65S20C15J	Essai1	5,8
	Essai2	6,5
	Essai3	5,3
	Essai4	5,5

Source : Auteur

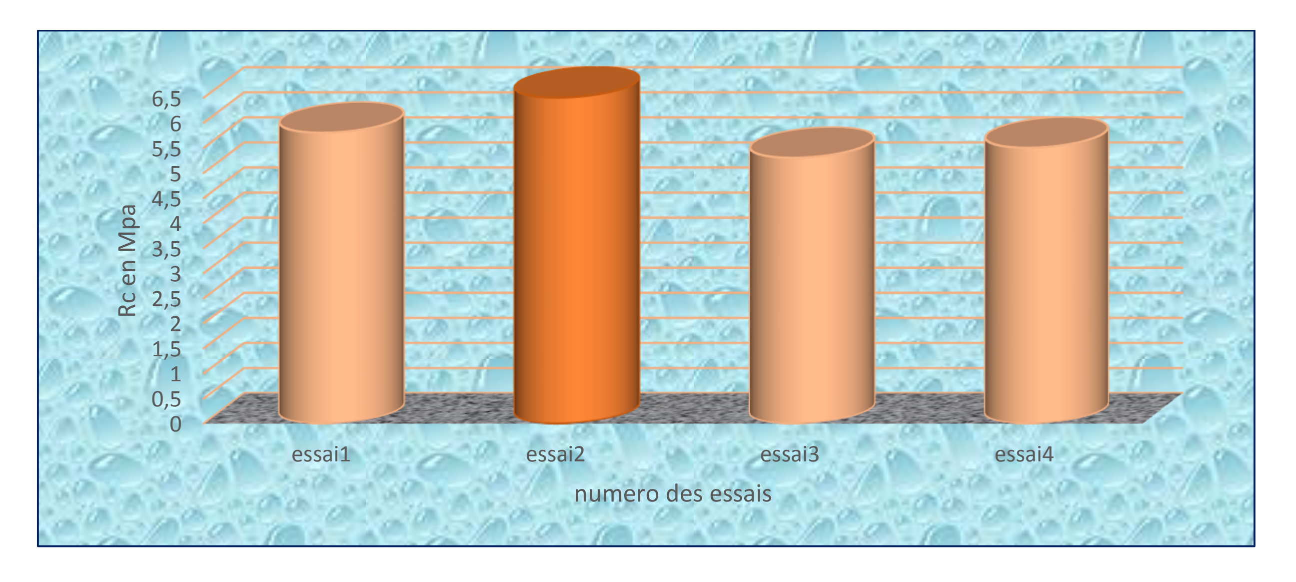


Figure 18 : variation de la résistance à la compression en fonction du processus d'obtention de la pâte de journaux

Nous avons une résistance à la compression entre 5,5 MPa et 6,5 MPa en faisant varier les processus d'obtention de la pâte de journaux.

Le tableau numéro12 indique la variation de la résistance à la compression en fonction du processus d'obtention de la pâte de carton

Tableau 12 : variation de la résistance à la compression en fonction du processus d'obtention de la pâte de carton

liant papier	N° des essais	Rc [MPa]
$P65S20C15C_a$	Essai09	5,42
	Essai10	6,03
	Essai11	5,11
	Essai12	5,20

Source : Auteur

La figure numéro 19 indique la variation de la résistance à la compression en fonction du processus d'obtention de la pâte de carton

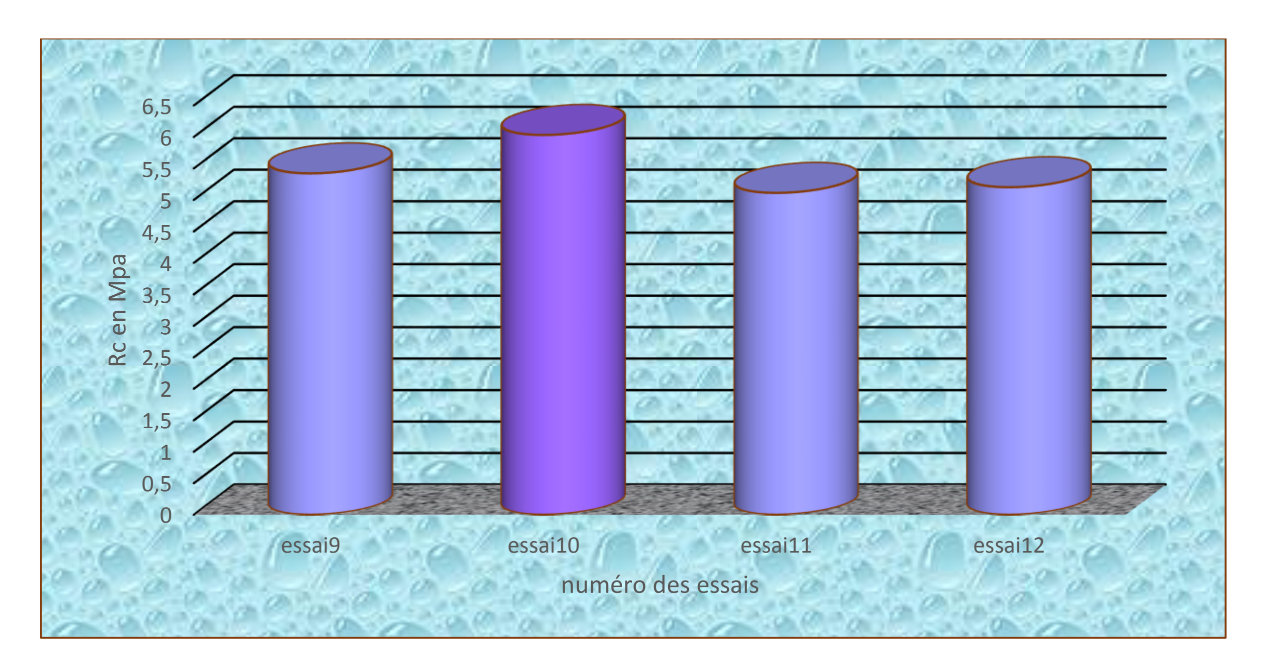


Figure 19 : variation de la résistance à la compression en fonction du processus d'obtention de la pâte de carton

Nous avons une résistance à la compression entre 5,2MPa et 6,03 MPa en faisant varier les processus d'obtention de la pâte de carton.

Le tableau numéro 13 donne la variation de la résistance à la compression en fonction du processus d’obtention de la pâte de papier vélin :

Tableau 13: Variation de la résistance à la compression en fonction du processus d'obtention de la pâte de vélin

liant papier	n° des essais	Rc [Mpa]
P65S20C15V	essai17	4,72
	essai18	5,56
	essai19	4,32
	essai20	4,68

Source : Auteur

La figure numéro 20 montre la variation de la résistance à la compression en fonction du processus d’obtention de la pâte de papier vélin :

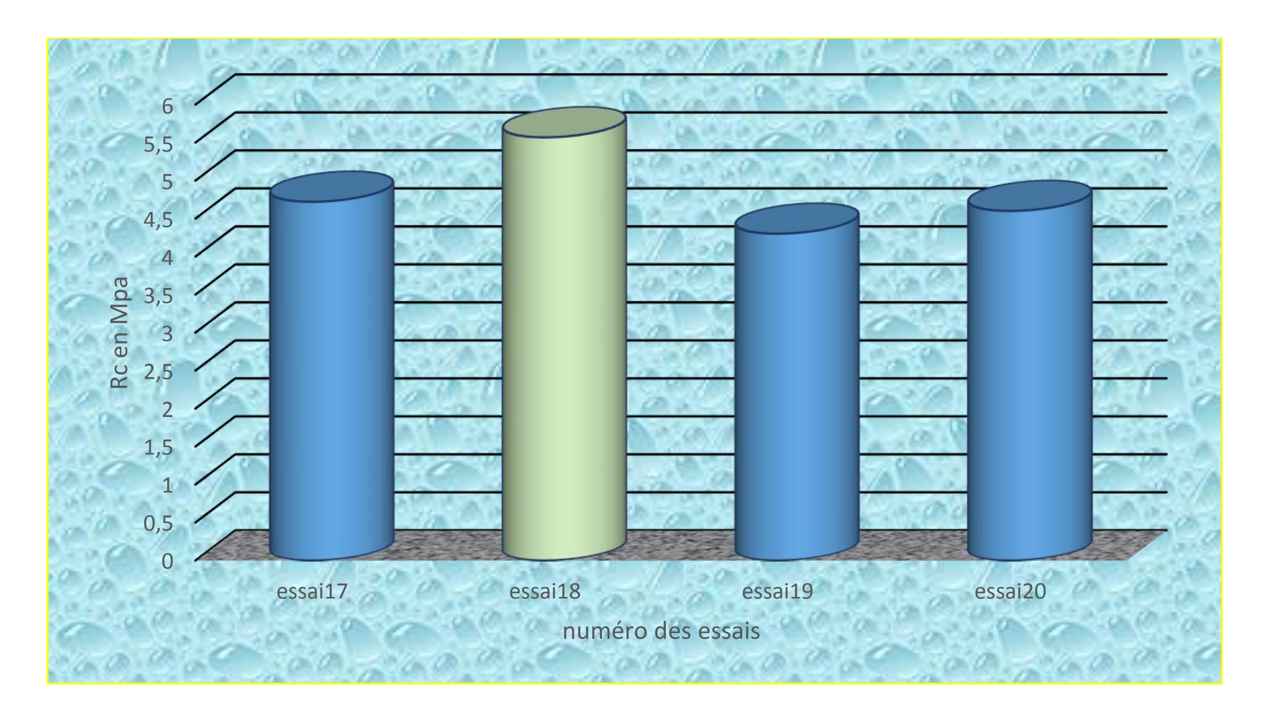


Figure 20 : variation de la résistance à la compression en fonction du processus d’obtention de la pâte de vélin

Nous avons une résistance à la compression entre 4,68 MPa et 5,56 MPa en faisant varier les processus d’obtention de la pâte de vélin.

Nous avons constaté que les essais pour l'obtention de la pâte de papier numéro 2, numéro 10 et numéro18 sont optimales pour avoir le maximum de résistance à la compression du liant papier. Ce qui explique la dépendance entre le processus d'obtention de la pâte de papier et le produit obtenu. Si les déchets papier-carton sont mouillés, le broyage et facilement effectué et la taille des grains est uniforme d'où la bonne adhérence entre les matières premières. Ce qui explique une augmentation de la résistance à la compression du liant papier.

II. Résultats des mesures de la masse volumique du liant papier :

La masse volumique du liant papier à 5 % de ciment en fonction du pourcentage de sable est résumée dans le tableau numéro 14 :

Tableau 14 : variation de la masse volumique du liant papier à 5% du ciment en fonction du pourcentage de sable

Désignation	Pate de papier [%]	Sable [%]	Ciment [%]	masse volumique [Kg/m^3]
P95S0C5	95	0	5	320
P90S5C5	90	5	5	490
P85S10C5	85	10	5	640
P80S15C5	80	15	5	732
P75S20C5	75	20	5	824
P70S25C5	70	25	5	972
P65S30C5	65	30	5	981
P60S35C5	60	35	5	994

Source : Auteur

D'après les mesures effectuées, la masse volumique du liant papier à 5% de ciment en fonction du pourcentage de sable varie de 320 Kg/m^3 à 994 Kg/m^3. Nous avons constaté que la masse volumique du liant papier augmente en fonction du pourcentage de sable.

La figure 21 montre la variation de la masse volumique du liant papier à 5% de ciment en fonction du pourcentage de sable

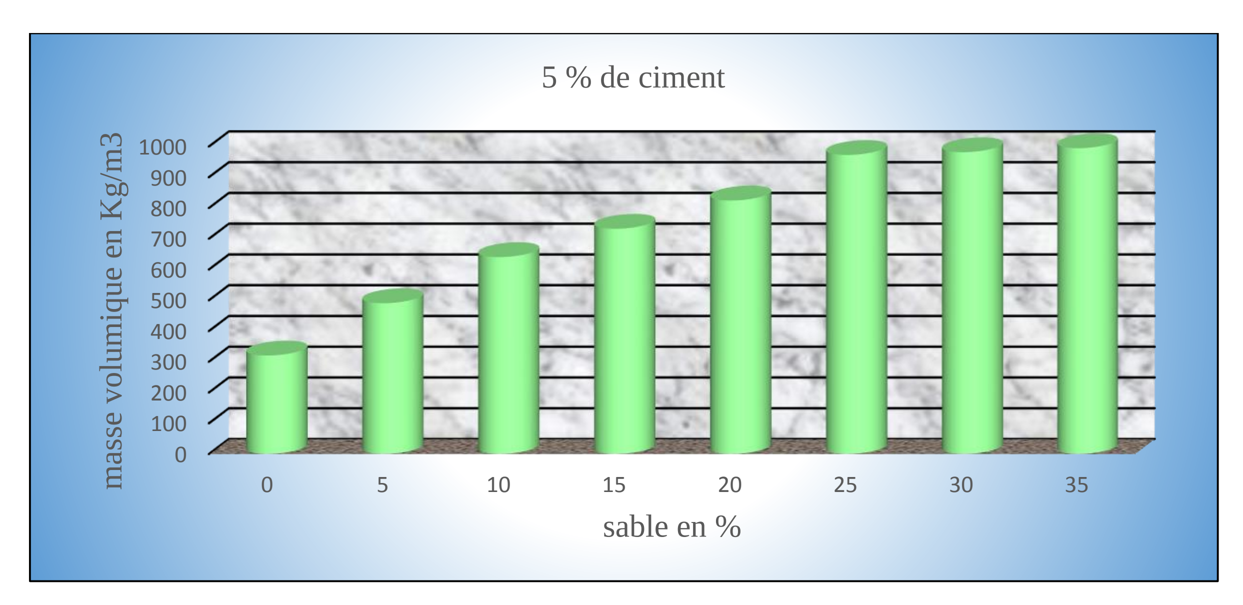


Figure 21 : variation de la masse volumique du liant papier à 5% de ciment en fonction du pourcentage de sable

La masse volumique du liant papier à 10 % de ciment en fonction du pourcentage de sable est donnée dans le tableau numéro 15

Tableau 15 : variation de la masse volumique du liant papier à 10% de ciment en fonction du pourcentage de sable

désignation	Pate de papier [%]	Sable [%]	Ciment [%]	masse volumique [Kg/m^3]
P90S0C10	90	0	10	560
P85S5C10	85	5	10	728
P80S10C10	80	10	10	860
P75S15C10	75	15	10	925
P70S20C10	70	20	10	950
P65S25C10	65	25	10	986
P60S30C10	60	30	10	1044
P55S35C10	55	35	10	1140

Source : Auteur

La masse volumique du liant papier à 10% de ciment en fonction du pourcentage de sable varie de 560 Kg/m^3 à 1140 Kg/m^3. D'après le tableau ci-dessus, la masse volumique du liant papier augmente en fonction du pourcentage de sable. Il est évident de l'affirmer car la masse volumique du sable est la plus grande par rapport à la masse volumique de deux autres matériaux (pate de papier et le ciment).

La figure numéro 22 illustre la variation de la masse volumique du liant papier à 10% de ciment en fonction du % de sable

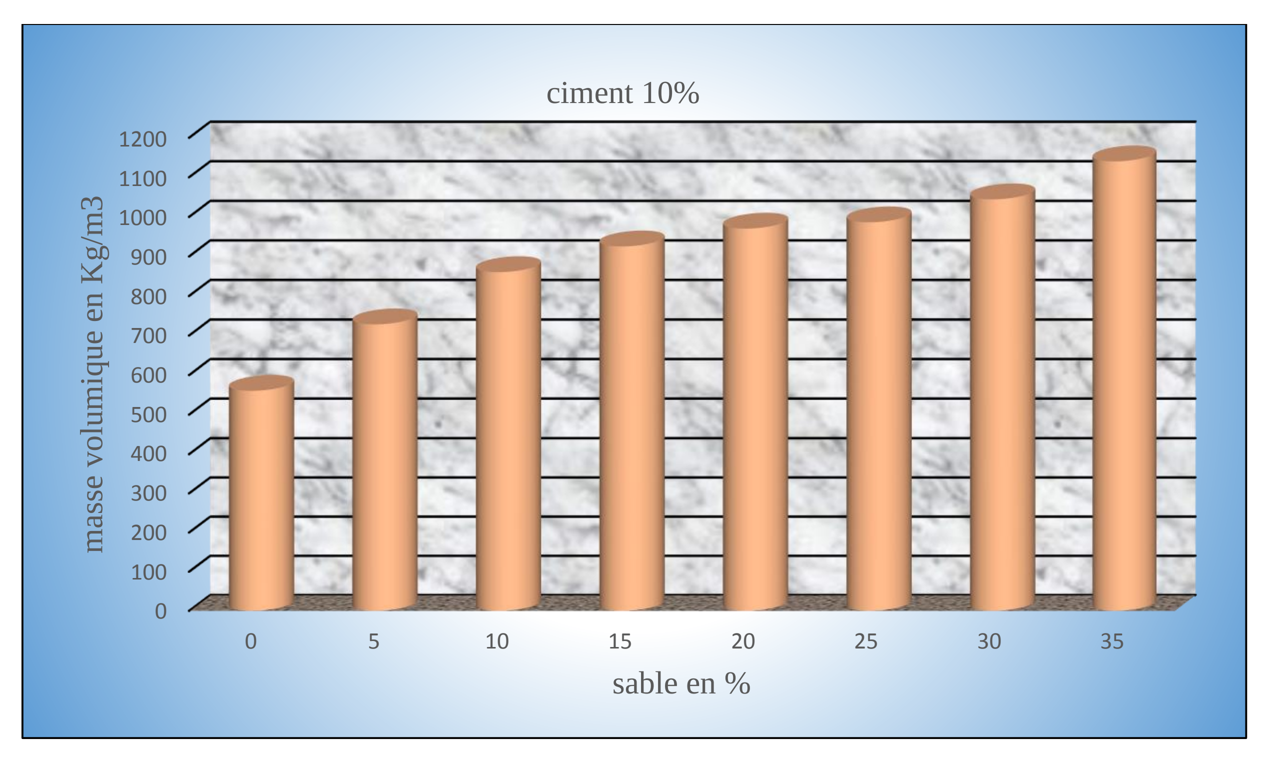


Figure 22 : variation de la masse volumique du liant papier à 10% de ciment en fonction du pourcentage de sable

III. Résultats de mesures de la résistance à la compression du liant papier :

III.1. Variation de la résistance à la compression du liant papier en fonction du pourcentage de sable :

Le tableau et la figure ci-dessous présentent la variation de la résistance à la compression du liant papier à 5% de ciment en fonction du pourcentage de sable :

Tableau 16 : variation de la résistance à la compression du liant papier à 5% de ciment en fonction du pourcentage de sable

Désignation	Pate de papier [%]	Sable [%]	Ciment [%]	Rc [MPa]
P95S0C5	95	0	5	1,97
P90S5C5	90	5	5	2,18
P85S10C5	85	10	5	2,46
P80S15C5	80	15	5	2,87
P75S20C5	75	20	5	3,07
P70S25C5	70	25	5	3,17
P65S30C5	65	30	5	3,26
P60S35C5	60	35	5	3

Source : Auteur

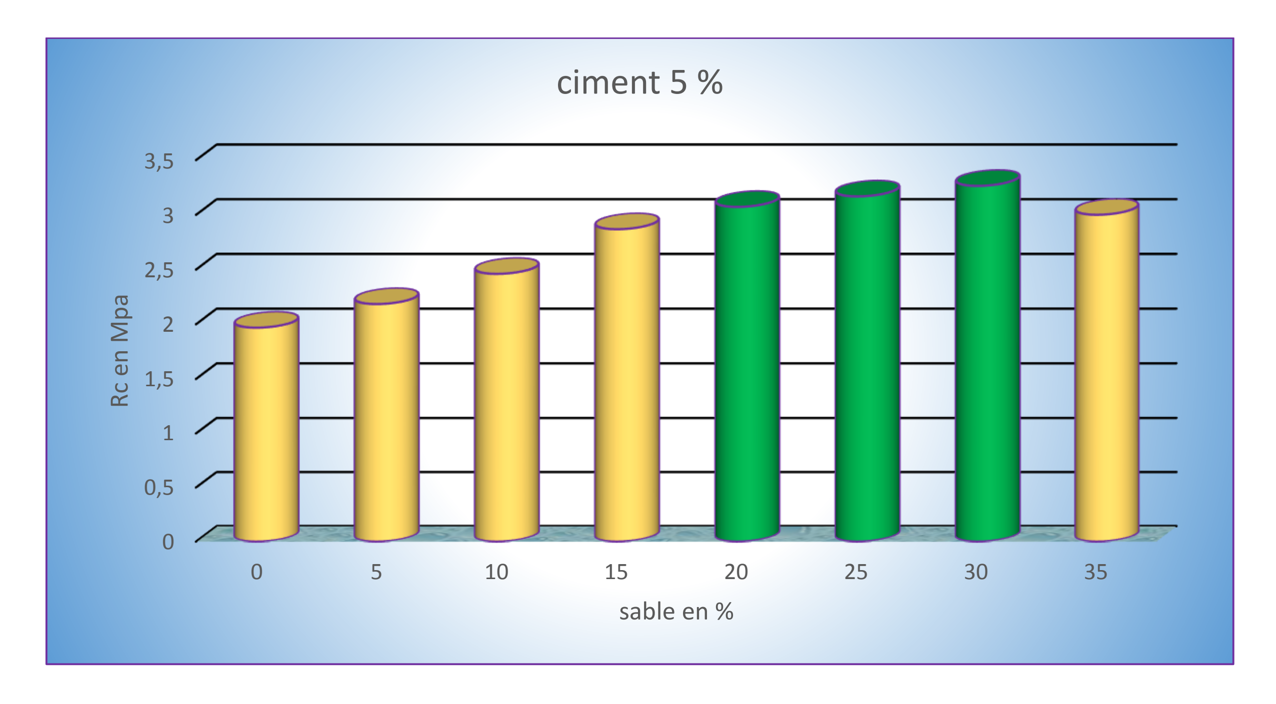


Figure 23 : variation de la résistance à la compression du liant papier à 5% de ciment en fonction du pourcentage de sable

Nous avons une résistance à la compression qui varie de 1,97 MPa à 3 MPa. Ce tableau nous montre que la résistance à la compression du liant papier est maximale si le pourcentage de sable est compris entre 20% et 30%.

Le tableau numéro 17 et la figure ci-dessous montrent la variation de la résistance à la compression du liant papier à 10% de ciment en fonction du pourcentage de sable :

Tableau 17 : variation de la résistance à la compression du liant papier à 10% de ciment en fonction du pourcentage de sable

désignation	Pate de papier [%]	Sable [%]	Ciment [%]	Rc [Mpa]
P90S0C10	90	0	10	2,4
P85S5C10	85	5	10	2,72
P80S10C10	80	10	10	4,16
P75S15C10	75	15	10	5,12
P70S20C10	70	20	10	6,08
P65S25C10	65	25	10	6,32
P60S30C10	60	30	10	6,87
P55S35C10	55	35	10	6,41

Source : Auteur

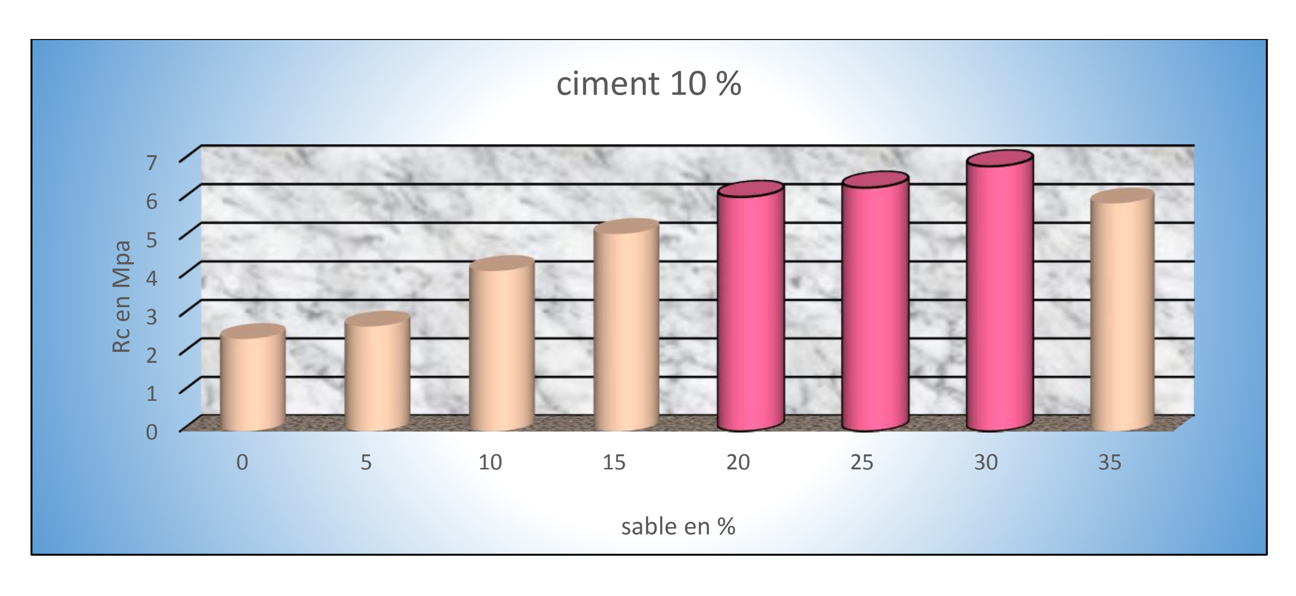


Figure 24 : variation de la résistance à la compression du liant papier à 10% de ciment en fonction du pourcentage de sable

Nous avons une résistance à la compression comprise entre 2,4 MPa à 6,21 MPa.

Les résultats nous montrent que la résistance à la compression du liant papier est maximale si le pourcentage de sable est compris entre 20% et 30%.

III.2. Variation de la résistance en traction par flexion et la résistance à la compression du liant papier en fonction du pourcentage de ciment :

La variation de la résistance en traction par flexion et à la compression du liant papier à 20% de sable en fonction du pourcentage de ciment est résumée dans le tableau et la figure suivants :

Tableau 18 : variation de la résistance en traction par flexion et la résistance à la compression du liant papier à 20% de sable en fonction du pourcentage de ciment

désignation	Pate de papier [%]	Sable [%]	Ciment [%]	Rt [MPa]	Rc [MPa]
P80S20C0	80	20	0	0,93	1,99
P75S20C1	75	20	5	1,35	3,07
P70S20C2	70	20	10	2,22	5,25
P65S20C3	65	20	15	2,54	6,50
P60S20C4	60	20	20	2,96	8,20

Source : Auteur

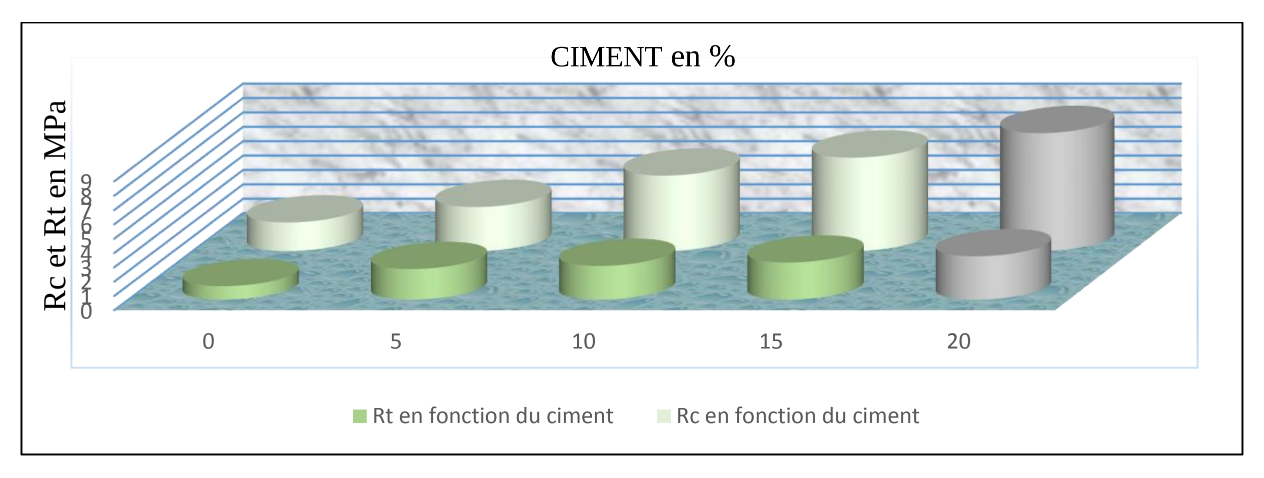


Figure 25 : variation de la résistance en traction par flexion et la résistance à la compression du liant papier à 20% de sable en fonction du pourcentage de ciment

La résistance en traction par flexion est comprise entre 0,93 MPa et 2,96 MPa et la résistance à la compression varie de 1,99 MPa à 8,2 MPa. D'après les résultats obtenus, nous pouvons dire que la résistance en traction par flexion et résistance à la compression augmente en fonction du pourcentage de ciment. Dans la composition du liant papier, le ciment joue le rôle d'un liant.

III.3. Variation de la résistance à la compression du liant papier en fonction de types de pâte de papier :

La variation de la résistance à la compression en fonction de la pâte de papier journaux est résumée dans le tableau numéro 19 et la figure numéro 26:

Tableau 19 : variation de la résistance à la compression du liant papier en fonction de la pâte de papier journaux

Désignation	Pate de papier [%]	Sable [%]	Ciment [%]	Rc [Mpa]
P75S20C5J1	75	20	5	3,07
P70S20C10J2	70	20	10	5,26
P65S20C15J3	65	20	15	6,50
P60S20C20J4	60	20	20	8,21

Source : Auteur

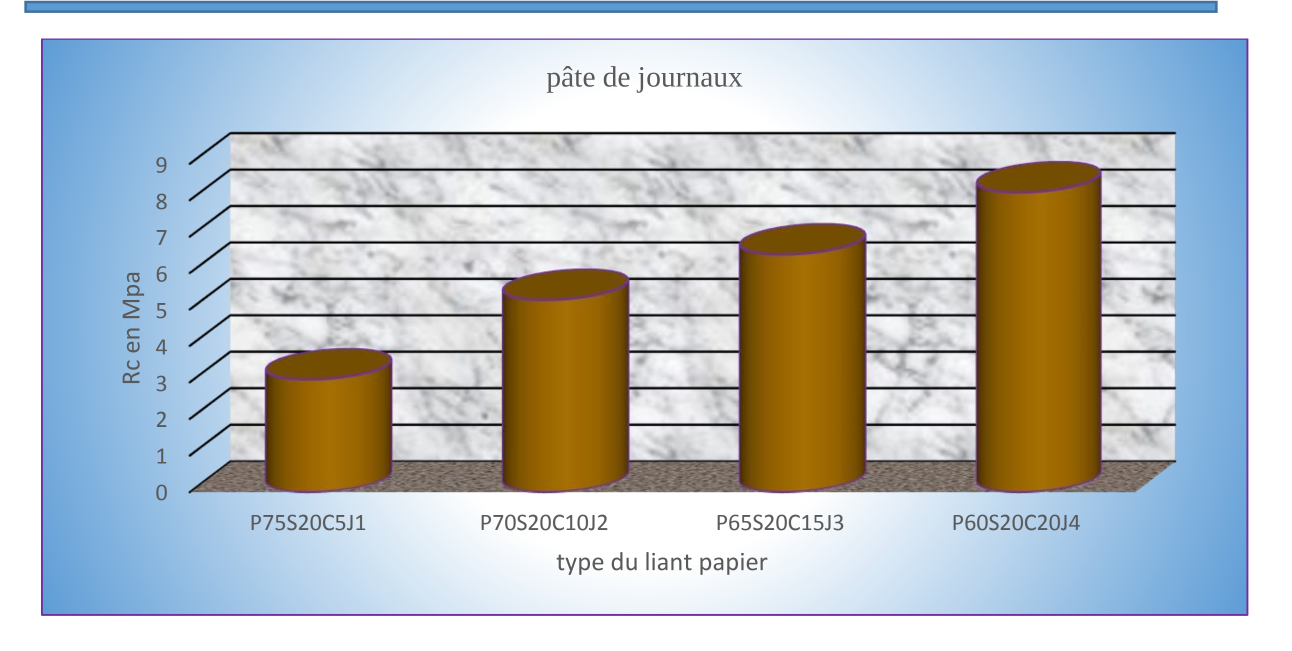


Figure 26 : variation de la résistance à la compression du liant papier en fonction de la pâte de papier journaux

La résistance à la compression du liant papier en fonction de la pâte de papier journaux est comprise entre 3,07 MPa et 8,21 MPa. Nous pouvons dire que l'utilisation de la pâte de papier journaux est la plus avantageuse sur la résistance mécanique par rapport aux deux autres pâtes de papier.

La variation de la résistance à la compression du liant papier en fonction de la pâte de papier vélin est résumée dans le tableau numéro 20 et la figure numéro 27:

Tableau 20 : variation de la résistance à la compression du liant papier en fonction de la pâte de papier vélin

Désignation	Pate de papier [%]	Sable [%]	Ciment [%]	Rc [Mpa]
P75S20C5V1	75	20	5	2,93
P70S20C10V2	70	20	10	3,62
P65S20C15V3	65	20	15	5,57
P60S20C20V4	60	20	20	5,91

Source : Auteur

La résistance à la compression du liant papier en fonction de la pâte de papier vélin est comprise entre 2,93 MPa et 5,91 MPa.

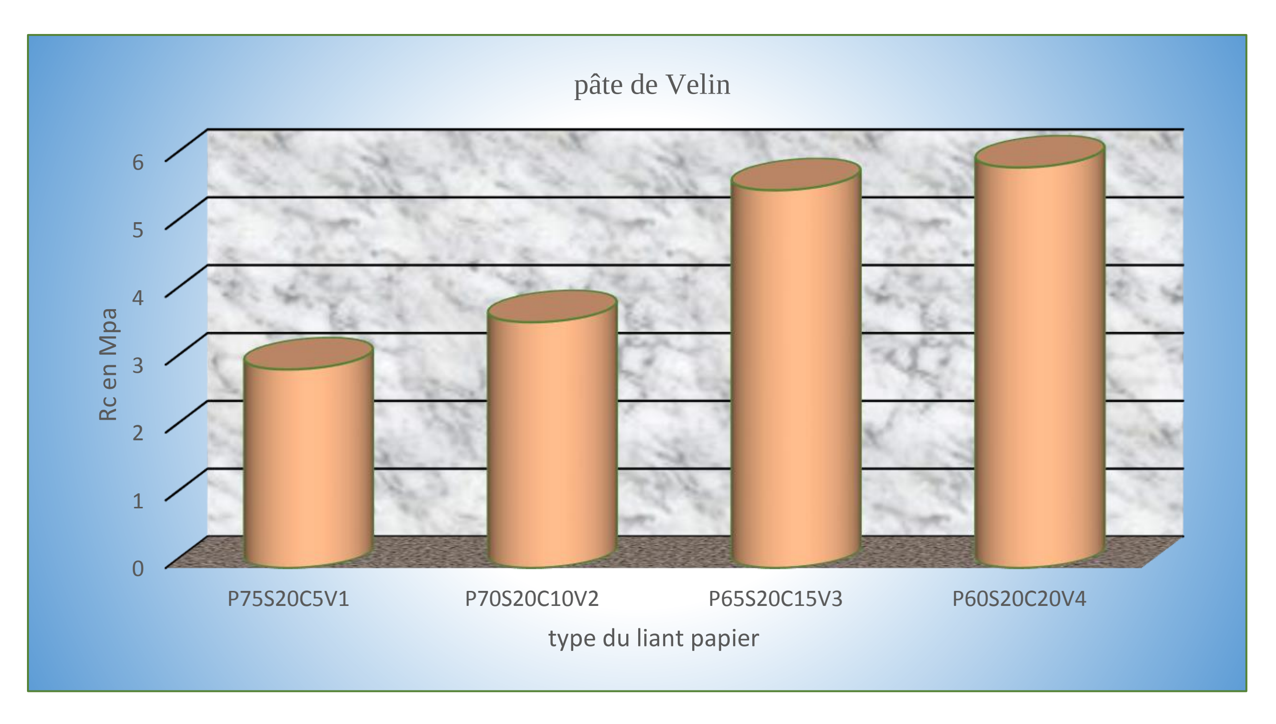


Figure 27:variation de la résistance à la compression du liant papier en fonction de la pâte de vélin

La variation de la résistance à la compression du liant papier en fonction de la pâte de carton est résumée dans le tableau numéro 21 et la figure numéro 28:

Tableau 21 : variation de la résistance à la compression du liant papier en fonction de la pâte de carton

Désignation	Pate de papier [%]	Sable [%]	Ciment [%]	Rc [Mpa]
P75S20C5Ca1	75	20	5	3
P70S20C10Ca2	70	20	10	4,44
P65S20C15Ca3	65	20	15	6,03
P60S20C20Ca4	60	20	20	7,06

Source : Auteur

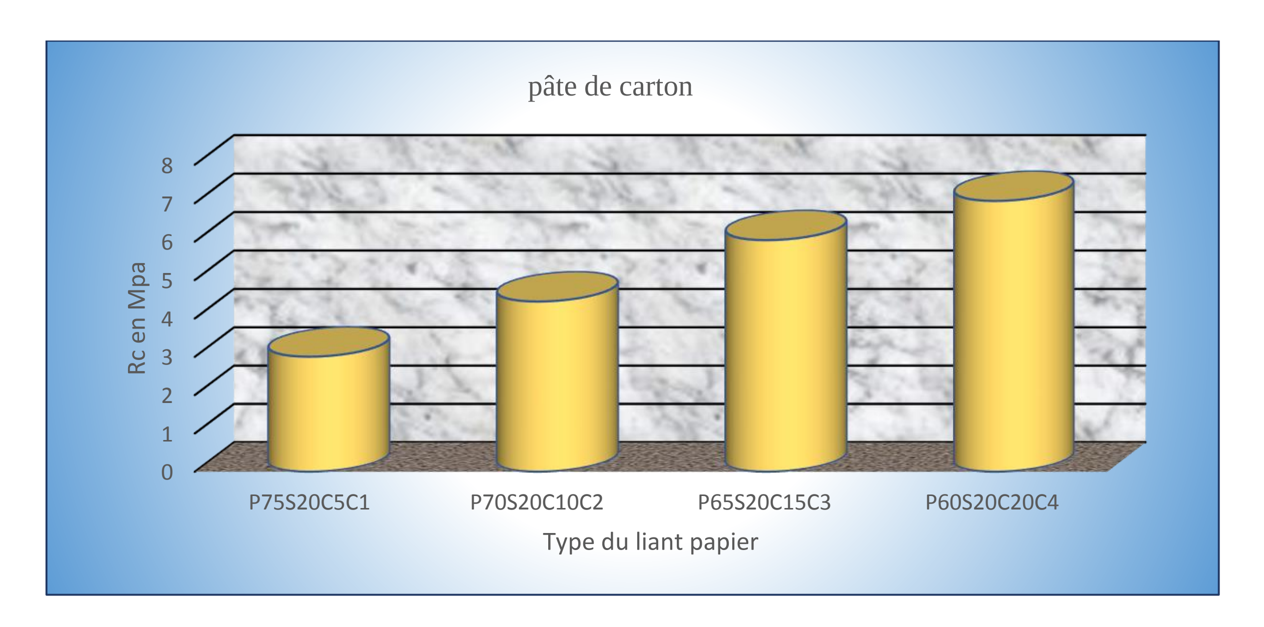


Figure 28 : variation de la résistance à la compression du liant papier en fonction de la pâte de carton

La résistance à la compression du liant papier en fonction de la pâte de papier carton est comprise entre 3 MPa et 7,06 MPa.

IV. Résultats de mesures de la Porosité :

Nous avons déterminé les résultats de mesures de la porosité du liant papier à base de la pâte de papier journaux, papier vélin et carton après immersion du liant papier pendant 72 heures.

Les résultats de mesures de la porosité du liant papier à base de la pâte de papier journaux en fonction du pourcentage de ciment sont donnés dans le tableau et la figure suivants :

Tableau 22 : variation de la porosité du liant papier à base de la pâte de papier journaux en fonction du pourcentage de ciment

Désignation	Pate de papier [%]	Sable [%]	Ciment [%]	porosité [%]
P75S20C5J1	75	20	5	67,61
P70S25C5J2	70	20	10	53,05
P65S30C5J3	65	20	15	44,02
P60S35C5J4	60	20	20	29,85

Source : Auteur

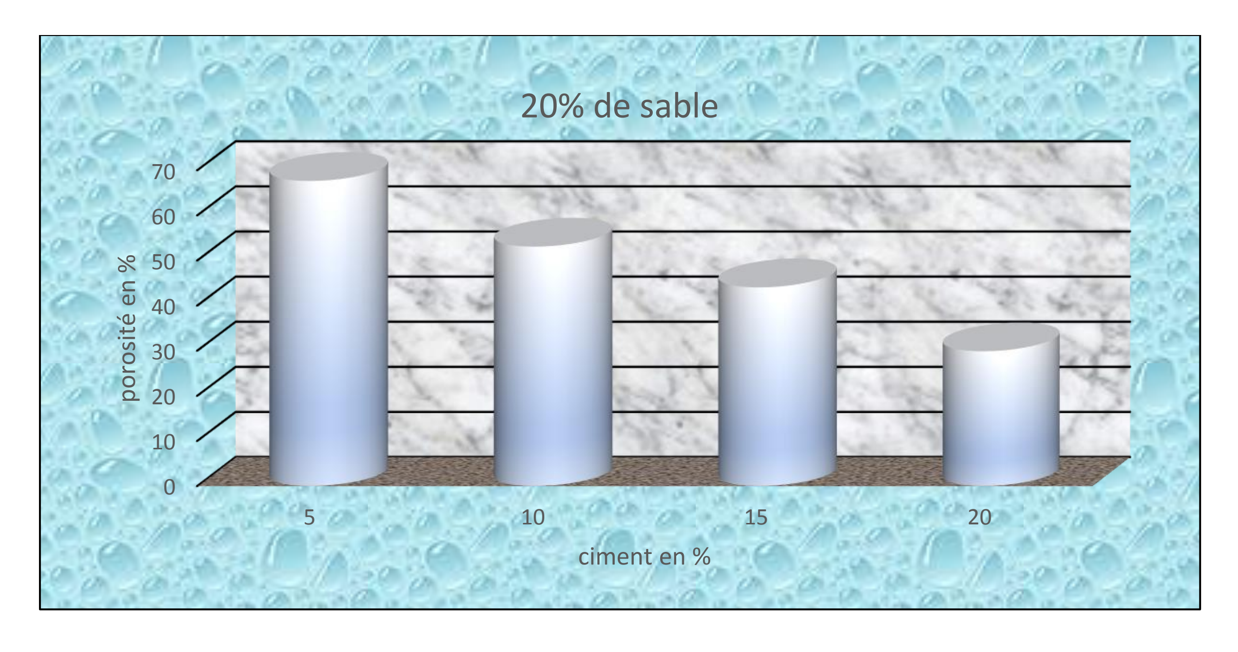


Figure 29 : variation de la porosité du liant papier à base de la pâte de papier journaux en fonction du pourcentage de ciment

Les résultats de mesures de la porosité du liant papier à base de la pâte de papier vélin en fonction du pourcentage de ciment sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 23 : variation de la porosité du liant papier à base de la pâte de papier vélin en fonction du pourcentage de ciment

Désignation	Pate de papier [%]	Sable [%]	Ciment [%]	Porosité [%]
P75S20C5V1	75	20	5	71,52
P70S25C5V2	70	20	10	55,24
P65S30C5V3	65	20	15	46,9
P60S35C5V4	60	20	20	37,2

Source : Auteur

La figure ci-dessous nous presente la variation de la porosité du liant papier à base de la pâte de papier vélin en fonction du pourcentage de ciment**:**

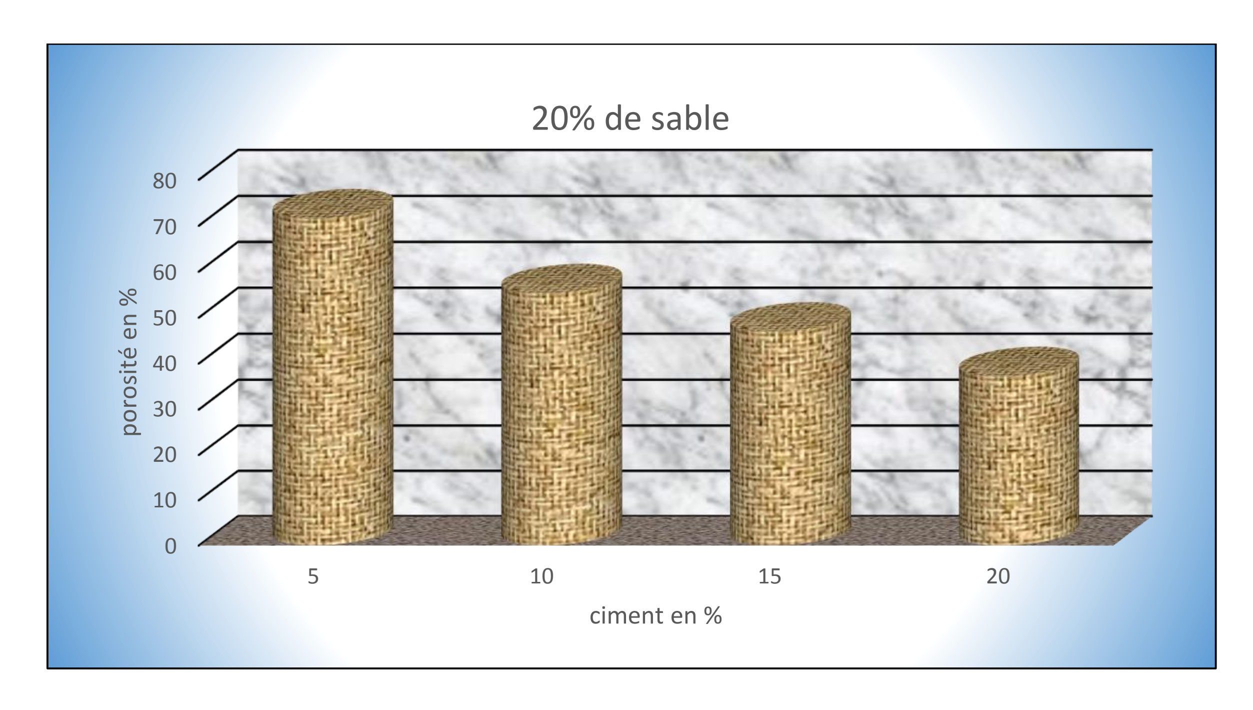


Figure 30 : variation de la porosité du liant papier à base de la pâte de papier vélin en fonction du pourcentage de ciment

Les résultats de mesures de la porosité du liant papier à base de la pâte de carton en fonction du pourcentage de ciment sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 24 : variation de la porosité du liant papier à base de la pâte de carton en fonction du pourcentage de ciment

Désignation	Pate de papier [%]	Sable [%]	Ciment [%]	Porosité [%]
P75S20C5C1	75	20	5	75,44
P70S25C5C2	70	20	10	62,96
P65S30C5C3	65	20	15	49,8
P60S35C5C4	60	20	20	40,84

Source : Auteur

La figure numero 31 nous montre la variation de la porosité du liant papier à base de la pâte de carton n en fonction du pourcentage de ciment **:**

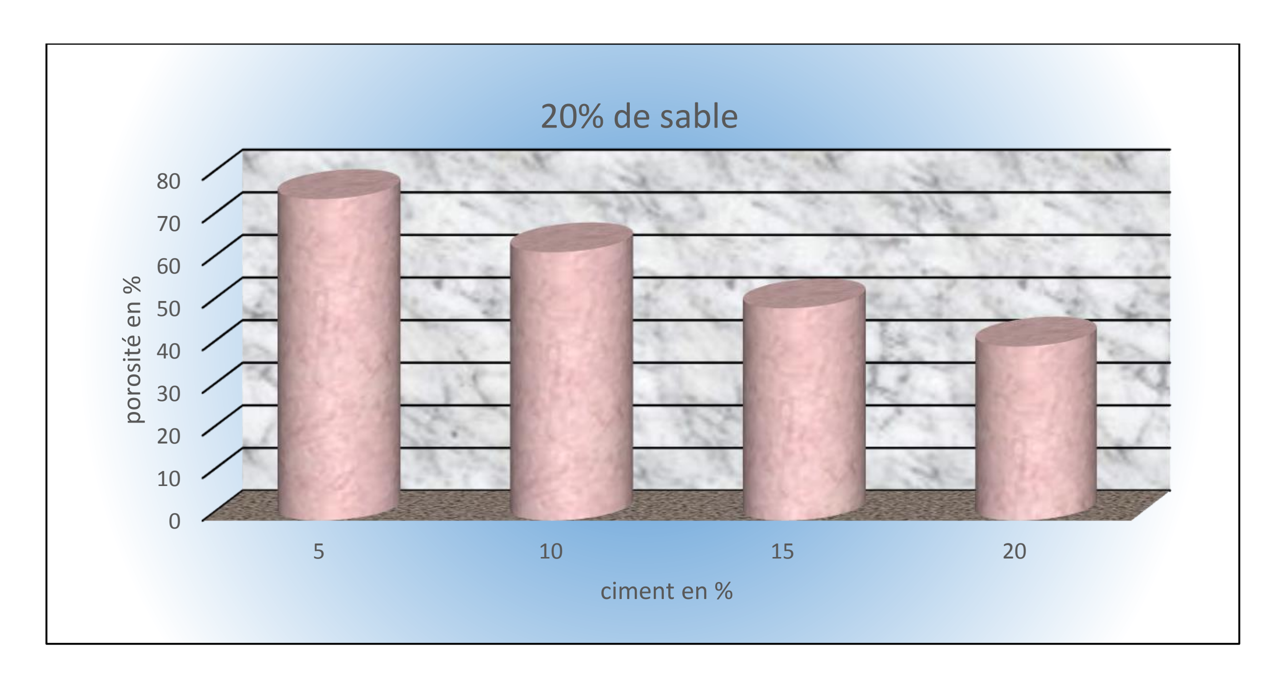


Figure 31 : variation de la porosité du liant papier à base de la pâte de carton en fonction du pourcentage de ciment

La porosité du liant papier à base de la pâte de papier journaux varie de 29,85% à 67,61%. Celle du liant papier à base de la pâte de papier vélin est comprise entre 37,2% à 71,52% et celle du liant papier à base de la pâte de carton varie de 40,84% à 75,44%. Ces résultats présentent aussi l'avantage du liant papier à base de pâte de journaux par rapport aux deux autres pâtes. La porosité du liant papier augmente en fonction du pourcentage de la pâte de papier. Par contre, elle diminue si le pourcentage du ciment et du sable augmente.

V. Résultats de mesures à la résistance au feu :

Le liant papier sans autres mélanges c'est-à-dire à 100% pâte de papier prend feu. Par contre, en contact pendant dix minutes avec une flamme de chalumeau oxyacétylénique (panache de la flamme à environ 2700°C), le liant papier ne prend pas feu, mais sa structure se détériore fortement. Ceux-ci sont dus par l'existence du ciment et du sable dans la composition du matériau.

Troisième partie :

ETUDE D'EXPLOITATION

Chapitre 9 : MANIPULATION DE LA MACHINE A BROYER

I. Le broyage par cisaillement:

Le broyage par cisaillement est un traitement s'appliquant à des déchets solides, en général relativement friables. Il ne nécessite aucune préparation particulière des déchets (à part une certaine homogénéité de taille). Il s'obtient par l'action de forces externes au matériau. La fragmentation des particules est aléatoire, car elle dépend largement de la probabilité d'impact entre corps broyant et particules, ou de la friction abrasive entre particules ou entre particules et corps broyant. Ainsi, une même particule peut être broyée plusieurs fois tandis que d'autres ne le seront jamais. Les machines utilisées comportent, en général, un rotor équipé de dents ou de couteaux qui travaillent en cisaillement, tranchage, éclatement ou déchiquetage. Ce type de traitement est en particulier utilisé par les industries de fabrication de piles électriques et d'accumulateurs, de fils et câbles électriques, et les industries de fabrication et transformation de papier et carton.

Un broyage est caractérisé par différents paramètres :

- la capacité d'admission (taille des plus gros blocs pouvant être traités par la machine) ;
- le rapport optimal de réduction, c'est à dire le rapport de la taille des pièces à la sortie sur la taille des pièces à l'entrée. Comme toutes les pièces ne sont pas de même taille, on raisonne à partir d'une taille seuil, obtenue pour 85% des pièces ;
- la distribution granulométrique en sortie.

II. Quelques types d'un broyeur à rotor et stator avec ses caractéristiques :

II.1. Broyeurs à meules de corindon

La tête de broyage de ces broyeurs est constituée de meules de corindon fritté. La meule constituant le rotor tourne à grande vitesse contre une meule stator fixe. Le produit, alimenté à sec ou sous forme de suspension, subit entre les deux meules d'importants effets de cisaillement, de frottement et de choc. La précision du réglage de l'écartement des meules est de 10^{-3} mm. Une version identique existe avec des disques dentés en acier durci et inoxydable. Suivant les modèles, les débits sont très variables selon qu'il s'agit de substances cristallines (10 à 440 kg/h), de substances organiques (20 à 530 kg/ h), de peinture (80 à 3 600 kg/ h), pour obtenir des finesses de 10 à 20 µm. Le broyeur à meules peut être transformé en broyeur à passage forcé. Celui-ci est constitué d'un couteau à quatre lames qui tourne à grande vitesse (3 000 tr/min).

II.2. Broyeurs à agitateur

Ces broyeurs sont constitués par des tubes horizontaux ou verticaux qui forment un stator lisse pourvu d'un agitateur formé par des disques excentrés dont la disposition est hélicoïdale. Il existe aussi un système constitué par un agitateur équipé de broches ou de barreaux et comportant ou non une contrepartie semblable à l'intérieur du stator afin de créer des zones de broyage successives.

II.3. Broyeurs à impact

Ils sont constitués d'un disque rotatif, pourvu de 2 ou 3 rangées de broches concentriques, qui tourne à grande vitesse (7 600 à 14 000 tr/min) dans un stator lui-même équipé de 2 ou 3 couronnes de broches. Il existe des versions avec tamis périphérique ou équipées de disques batteurs (à marteaux pendulaires ou à plaques) ou d'anneau stator ou de tamis. Ces appareils travaillent sur des solides secs de dureté inférieure à 3 et conviennent pour l'effilochage et l'émottage de produits tendres, cristallins, cassants, fibreux.

III. Eléments caractéristiques de base de notre machine à broyer:

Le moteur : la machine à broyer utilise un moteur asynchrone triphasé à rotor à cage d'écureuil qui tourne à une vitesse de 1500Tr/min.la plaque signalétique indique les caractéristiques suivantes :

- Vitesse de rotation : 1500Tr/min
- Intensité de courant nominale : A
- Tension d'alimentation : 220/380V
- Fréquence : 50Hz
- Couplage : Triangle et Etoile (△/Y)
- Puissance nominale : 4Kw

Pour le stator et pour le rotor, le couplage des enroulements est en étoile car nous utilisons une tension d'alimentation de 380V.en utilisant un variateur de fréquence, La vitesse de rotation varie de 0 à 1500Tr/mn.



Photo 03 : moteur de la machine

Chapitre 10 : LA MACHINE A PRESSE

I. Quelques types de machines à presse:

Plusieurs machines à presse ont été construites pour confectionner des matériaux. Celles-ci peuvent être inspirées de même principe. Nous vous citons en dessous quelques machines à presse avec leurs caractéristiques :

La presse CINVA-RAM a été développée en 1956 par Raul Ramirez, ingénieur du centre inter- Américain de l'habitat. La presse fourni 8 tonnes de compression pour produire un bloc de 290*140*90mm.

La presse TERSTARAM avec un poids de 340Kg, est développé par APPRO-TECHNICO, donne une pression de compactage de 15 tonnes pour produire un bloc de 295*140*90mm. Le taux de compression, qui est la différence entre la hauteur du moule contenant les matières premières non compactées et la hauteur du bloc compacté est 1,65.

Les éléments caractéristiques de base de la machine à presse que nous utilisons lors de la fabrication du liant papier sont détaillés ci-dessous.

II. Eléments caractéristiques de base :

La boite est fabriquée à partir d'une tôle d'épaisseur de 12 mm (230mm de longueur, 200mmde largeur et 150mm de hauteur). La forme voulue dépend de la forme de la boite. Le matériau est emboitable et empilable dont les dimensions sont 230*200*100 mm.

II.1. Le couvercle :

Le couvercle est en tôle acier de même épaisseur que la boite. Il résiste à la compression occasionnée par le piston et la bielle. Un système de cliquet est monté sur le genou pour accrocher le couvercle durant le démoulage.

II.2. Piston et bielle :

La bielle (en 2 fer plat de dimension 10*80*20mm) est reliée au piston en tube de diamètre 30mm. Pour le démoulage, des roulettes sont placées et utilisées comme points d'appui pour levier.

II.3. Levier de pression :

Le levier de pression est un tube de diamètre 60mm et de longueur 1,8 m. Il faut un tube plus long pour faciliter le pressage lors de la mise en œuvre.

II.4. Piédestal de fixation :

L'utilisation de la fixation est importante pour éviter le déséquilibre pendant la compression.

Les caractéristiques de la machine à presse sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 25 : caractéristique de la machine à presse

Production	cycle de 1 minute pour 1 bloc de matériau (remplissage, pressage, démoulage)
Fonctionnement	très simple
Personnel	une personne
énergie consommation	manuel sans moteur
produits fabriqués	liant papier (brique) de dimension 230*200*100mm

Source : Auteur

Notre machine à presse présente plusieurs avantages :

- possibilité de transporter cette machine à l'endroit où s'effectue la mise en œuvre ;
- installation facile de la machine, sans ouvrage de génie-civil ;
- fabrication écologique ;
- fabrication à froid, sans cuisson ;
- fabrication propre - Sans aucun déchet, nuisance, sans bruit, ni résidus ;
- fabrication en totale sécurité pour le Personnel ;
- personnel non spécialisé ;
- fabrication possible en «non-stop» 24 x 24 h à plusieurs équipes ;
- mise en marche/arrêt de la fabrication en quelques minutes.



Photo 04 : pressage du mélange par la machine à presse



Photo 05 : démoulage du liant papier

Chapitre 11 : ETUDES COMPARATIVE

Le but de ce chapitre est de faire une comparaison entre les matériaux de construction et le liant papier. Notre étude est divisé en 3 étapes : le choix du liant papier, étude sur le plan économique (les caractéristiques des matériaux à comparer et les couts totaux tels que le cout des matières premières ; le cout de la main d'œuvre; le cout d'énergie du liant papier) et enfin étude sur le plan environnemental.

Les données de base sont les suivantes :

- Capacité par heure du broyeur (pate de papier) : 137,14 Kg pour le papier journaux, 91,5Kg pour le papier vélin et 78,5 Kg pour le carton.
- Puissance nominale : 4Kw
- Cout variable d'électricité : Si inférieur à 130 KWH le cout est 250Ar, Si supérieur à 130 KWH le cout est 350Ar
- Cout d'un sac de 50Kg du ciment CEM I 42,5 : 25000 Ar
- Cout d'un mètre cube du sable : 25000 Ar
- Main d'œuvre par unité de matériau : 50 Ar
- Heure du travail par jour : 8 heures
- Capacité de la machine à presse : 60 matériaux par heures
- Salaire moyenne par personne : 220000 Ar par mois

I. Choix du liant papier :

L'utilisation de la recherche opérationnelle détermine le type des matériaux et le nombre qu'il faut produire pour avoir la production maximale. La méthode utilisée est la résolution par méthode de tableau et le logiciel LINDO. En effet, nous devons établir un programme linéaire.

Le programme linéaire est obtenu à partir du tableau ci-dessous :

Tableau 26 : les variables, contraintes et les capacités de production

type du liant papier	ciment en [%]	sable en [%]	énergie en [%]	main d'œuvre en [%]	prix de revient [Ar]
P75S20C5J1	5	20	11,69	18,45	291,3
P70S20C10J2	10	20	6,89	11,33	461,52
P65S20C15J3	15	20	4,67	7,56	631,7
P60S20C20J4	20	20	3,39	6,39	801
capacité journalière	50(Kg)	100(Kg)	29,45(KWh)	10000(Ar)	

Source : Auteur

Nous devons déterminer le nombre et les types du liant papier qu'il faut produire pour cette production maximale. Il s'agit de mettre le problème sous forme d'équation en précisant :

- l'objectif à optimiser ;
- les variables à utiliser ;
- les contraintes techniques à respecter qui sont liées à la capacité de production.

Soit Z la fonction objectif et X1, X2, X3, X4 les variables du programme

Avec MaxZ=291,3X1 + 461,52X2 + 631,7X3 + 802X4

$$\begin{cases} 0{,}05X1 + 0{,}1X2 + 0{,}15X3 + 0{,}2X4 \leq 50 \\ 0{,}2X1 + 0{,}2X2 + 0{,}2X3 + 0{,}2X4 \leq 100 \\ 0{,}117X1 + 0{,}069X2 + 0{,}047X3 + 0{,}034X4 \leq 29{,}45 \\ 0{,}184X1 + 0{,}113X2 + 0{,}076X3 + 0{,}064X4 \leq 10000 \\ X1 \geq 0,\ X2 \geq 0,\ X3 \geq 0,\ X4 \geq 0 \end{cases}$$

I.1. Résolution par la méthode de tableau

Ce programme contient des contraintes d'infériorité. Pour démarrer l'algorithme de Simplexe il faut mettre ce programme sous forme standard en introduisant dans les équations des variables d'écart : E_i

MaxZ-291,3X1 - 461,52X2 - 631,7X3 – 802X4=0

0,05X1 + 0,1X2 + 0,15X3 + 0,2X4 + E1=50

0,2X1 + 0,2X2 + 0,2X3 + 0,2X4 + E2= 100

0,117X1 + 0,069X2 + 0,047X3 + 0,034X4 + E3= 29,45

0,184X1 + 0,113X2 + 0,076X3 + 0,064X4 + E4= 10000

Mettons ces équations sous forme de tableau et la résolution suit les démarches suivantes : Soit P le pivot dans ce programme linéaire. Le choix de pivot est déterminé en repérant le plus petit coefficient dans la fonction objectif. Le rapport (ligne par ligne) entre la valeur de la colonne des contraintes par la valeur de la colonne qui contient le coefficient de la fonction objectif le plus petit est appelé le test.

Tableau 27 : transformation du programme linéaire sous forme de tableau

Z(O)	-291,3	-461,52	-631,7	-802	0	test
E1	0,05	0,1	0,15	0,2	50	250
E2	0,2	0,2	0,2	0,2	100	500
E3	0,117	0,069	0,047	0,034	29,45	866,17
E4	0,184	0,113	0,076	0,064	10000	156250
	X1	**X2**	**X3**	**X4**	**RESULTAT**	

Source : Auteur

Ici -801,2 est la plus petite valeur. Ainsi, le test est obtenu par le rapport entre la valeur de la 6eme colonne et 5eme colonne

Tableau 28 : résolution du programme par la méthode de simplexe itération1

Z(1)	-90,8	-60,52	-30,2	4010	200500	Test
X4	0,25	0,5	0,75	5	250	1000
E2	0,15	0,1	0,05	-1	50	333,33
E3	0,1085	0,052	0,0215	-0,17	20,95	193,08
E4	0,168	0,081	0,028	-0,32	9984	59428,57
	X1	**X2**	**X3**	**E1**	**RESULTAT**	

Source : Auteur

P=0,2, le variable X4 entre dans la base et E1 sort de la base

Le deuxième tableau est obtenu par le calcul suivant :

Ligne de pivot : L/P

Colonne de pivot :-C/P

Calculs des autres valeurs : N= Aij - (Lj*Ci)/P

L : ligne

P : pivot

C : colonne

Aij : les autres valeurs du tableau

Tableau 29 : résolution du programme par la méthode de simplexe itération2

Z(2)	836,86	-17,002	-12,20	3867,73	218032,35	Test
X4	-2,30	0,38	0,70	5,39	201,72	530,6060
E2	-1,38	0,02	0,02	-0,76	21,03	748,36
X1	9,21	0,47	0,19	-1,56	193,08	402,88
E4	-1,54	0,0004	-0,005	-0,05	9951,5	20566560,00
	E3	**X2**	**X3**	**E1**	**RESULTAT**	

Source : Auteur

Tableau 30 : résolution du programme par la méthode de simplexe itération 3

Z3	1163,82	35,47	-5,17	3812,14	224882,57	Test
X4	-9,61	-0,79	0,54	6,63	48,55	89,38
E2	-1,92	-0,05	0,008	-0,67	9,71	1122,22
X2	19,23	2,08	0,41	-3,26	402,88	974,41
E4	-1,55	-0,001	-0,005	-0,05	9951,36	
	E3	**X1**	**X3**	**E1**	**RESULTAT**	

Source : Auteur

Tableau 31 : résolution du programme par la méthode de simplexe itération4

Z(4)	1072,21	27,91	9,52	3875,37	225345,327
X3	-17,69	-1,46	1,84	12,21	89,38
E2	-1,76	-0,046	-0,015	-0,77	8,931
X2	26,54	2,69	-0,76	-8,31	365,92
E4	-1,65	-0,009	0	0,011	9951,85
	E3	**X1**	**X4**	**E1**	

Source : Auteur

Nous avons arrêté l'algorithme car toutes les valeurs de la fonction objectif sont positives.

La valeur de la fonction objectif est : 225345,327 AR

Les valeurs de X1 et X2 : 89,4 et 365,9

I.2. En utilisant le logiciel LINDO

Nous avons écrit dans le logiciel LINDO le programme suivant pour résoudre le problème

Max 291.3 X1 + 461.52 X2 + 631.7X3 + 802X4

subject to

ciment) 0.05 X1 + 0.1 X2 + 0.15 X3 + 0.2 X4 <= 50

sable) 0.2 X1 + 0.2 X2 + 0.2 X3 + 0.2 X4 <= 100

Energie) 0.117 X1 + 0.069 X2 + 0.047 X3 + 0.034 X4 <= 29.45

M.O) 0.184 X1 + 0.113 X2 + 0.076 X3 + 0.064 X4 <= 10000

VALEUR DE LA FONCTION OBJECTIF

Max Z= 225345.3

VARIABLE	VALEUR	VARIABLE D'ECART
X1	0.000000	27.917538
X2	365.929230	0.000000
X3	89.380516	0.000000
X4	0.000000	9.529927

NOMBRE D'ITERATIONS = 4

I.3. Interprétation des résultats:

Pour obtenir le maximale de production, il faut produire 366 pièces de liant papier de type P70S20C10J2 et 89 pièces de type P70S20C10J3. La fonction objectif maximale dans cette optimisation est 225345,3 Ar.

La machine à broyer produit 137,14 Kg de pâte de papier par heure soit 1,097 tonne par jour. A partir de cette pâte de papier, nous pouvons confectionner 299 blocs de liant papier. La machine à broyer ne produit pas la pâte de papier nécessaire pour obtenir le maximum de production. Ainsi, il faut améliorer la performance de notre machine.

La machine à presse produit 60 matériaux par heure soit 480 blocs de liant papier par jour. Ceci indique la possibilité de confectionner le nombre de liant papier maximale qu'il faut produire lors de l'optimisation.

II. Comparaison du matériau liant papier avec les autres matériaux :

II.1. Comparaison technique :

II.1.1 Parpaing :

- Parpaing plein béton : B80 5 x 20 x 50cm

Couleur : grise

Classe de résistance : B80 soit une résistance à 80 bars / 8 MPa

Dimensions : 5 x 20 x 50 cm

Masse volumique : 1500Kg/m^3

Norme : NF

Quantité au m² : 10

Utilisations: réalisation de mur porteur (façade et intérieur), mur de clôture, garage avec montage traditionnel au mortier ciment.



Figure 32 : parpaing plein en béton

- Parpaing creux béton B40 20 x 20 x 50cm

Spécialement adapté à la réalisation de murs de façades, murs de sous-sols, murs de refends, murs clôtures, garage.

Type de produit: Creux

Dimensions : 20 x 20 x 50cm

Composants essentiels du produit: Béton

Couleur : grise

Matériau de mise en œuvre préconisé : Mortier

Norme : NF

Densité : 880Kg/m^3

Résistance mécanique / à la compression : 4MPa



Figure 33:parpaing creux béton

II.1.2 Brique creuse de terre cuite :

Norme : NF P 13-301

Masse volumique : 1750-2050 Kg/m^3

Absorption d'eau : inférieur à 15%

Résistance à la compression 4 - 8 MPa

Utilisation : mur de cloison, mur porteur,….

II.1.3 Liant papier :

Dimensions : 23*20*10cm

Masse volumique : 300-1200 Kg/m^3

Couleur : généralement grise

Résistance à la compression : 2,9-8,2MPa



Figure 34: liant papier

II.1.4 Interprétation :

D'après ce que nous avons vu ci-dessus, le parpaing plein béton et le parpaing creux béton sont des bétons légers (selon la norme NF EN 206-1, la masse volumique d'un béton léger est comprise entre 800 et 2000 Kg/m^3). Ainsi, nous pouvons affirmer que le liant papier est un béton léger.

L'analyse de la résistance à la compression de ces quatre matériaux (le parpaing plein béton, le parpaing creux béton et la brique creuse) nous conduit à définir l'utilisation du liant papier : il peut remplacer ces matériaux de construction pour la réalisation d'un mur porteur, un mur de cloison,….

Notre matériau à base de pâte de papier a plusieurs avantages par rapport à ces trois matériaux : son faible poids qui facilite le transport, sa forme qui permet une élévation montée à sec sans mortier de maçonnerie grâce à un système autobloquant.

II.2. Sur le plan économique :

Nous avons étudié les prix de revient d'une unité du liant papier afin de le comparer avec une brique en terre cuite qui est utilisé dans le domaine de construction. Le prix estimatif (Le cout des matières premières, d'énergie et la main d'œuvre permet de déterminer le cout total du liant papier) du liant papier en papier journaux, en papier vélin et en carton est donné par les tableaux ci-dessous:

Tableau 32 : prix d'une unité de liant papier à base de la pâte de vélin

Pate de papier	liant papier	Ciment [Ar]	Sable [Ar]	Energie [Ar]	main d'œuvre [Ar]	cout total [Ar]
papier vélin	P75S20C5	172,5	34,5	35,3	50	292,3
	P70S20C10	345	34,5	32,9	50	462,4
	P65S20C15	517,5	34,5	30,6	50	632,6
	P60S20C20	690	34,5	28,2	50	802,7

Source : Auteur

Tableau 33 : résultats de prix d'une unité de liant papier à base de la pâte de journaux

Pate de papier	liant papier	Ciment [Ar]	Sable [Ar]	Energie [Ar]	main d'œuvre [Ar]	cout total [Ar]
papier journaux	P75S20C5	172,5	34,5	34,3	50	291,3
	P70S20C10	345	34,5	32,02	50	461,52
	P65S20C15	517,5	34,5	29,7	50	631,7
	P60S20C20	690	34,5	27,5	50	802

Source : Auteur

Tableau 34 : résultats de prix d'une unité de liant papier à base de la pâte de carton

Pate de papier	liant papier	Ciment [Ar]	Sable [Ar]	énergie [Ar]	main d'œuvre [Ar]	cout total [Ar]
Carton	P75S20C5	172,5	34,5	37,2	50	294,2
	P70S20C10	345	34,5	34,7	50	464,2
	P65S20C15	517,5	34,5	32,2	50	634,2
	P60S20C20	690	34,5	29,7	50	804,2

Source : Auteur

Analyse comparative du cout d'une brique en terre cuite et liant papier:

Brique en terre cuite :

Nous avons adopté le prix de vente d'une Brique de bonne qualité à 100Ar. Nous avons constaté qu'une brique à base de la pâte de papier peut remplacer 2,3 briques en terre cuite en maçonnerie. En termes de coût, on peut donc prendre comme coût minimale de production d'un bloc liant papier égal à 3 fois celle de la brique, pour que le projet soit rentable. On a donc le prix minimal acceptable pour le bloc en liant papier :

Prix minimal = 2,3*100=230Ar

Les prix de vente du liant papier à base de papier journaux en considérant 30% de bénéfice sont donnés par le tableau suivant :

Tableau 35 : prix de vente du liant papier en papier journaux

Ciment [Ar]	Sable [Ar]	Energie [Ar]	main d'œuvre [Ar]	cout total [Ar]	prix de vente [Ar]
172,5	34,5	34,3	50	291,3	378,69
345	34,5	32,02	50	461,52	599,97
517,5	34,5	29,7	50	631,7	821,21
690	34,5	27,5	50	802	1042,6

Source : Auteur

D'après le tableau ci-dessus, le liant papier a un surcout de :

- 39,26 % pour le liant papier de type P75S20C5
- 61,66 pour le liant papier de type P70S20C10
- 71,99 pour le liant papier de type P65S20C15
- 77,93pour le liant papier de type P60S20C20

Nous avons étudié les matières premières pour pouvoir diminuer le prix de vente du liant papier à 230Ar par unité. Pour comparer notre matériau avec la brique en terre cuite, il suffit de le réaliser un creux de volume 1800Cm^3 en gardant la forme du liant papier initiale.

En nous basant sur les données ci-dessous, le prix de vente du liant papier est donné par le tableau numéro 36 :

Tableau 36 : prix de vente réduit

cout de sable [Ar]	Ciment [Ar]	Energie [Ar]	main d'œuvre [Ar]	Totale [Ar]	prix de vente [Ar]
25,25	126,23	25,83	49,50	177,31	230,51
23,50	235,01	22,41	46,08	280,93	365,20
22,77	341,55	20,20	44,65	384,51	499,87
22,38	447,51	18,29	43,87	488,17	634,63

Source : Auteur

D'après l'analyse de ce tableau, nous pouvons comparer le liant papier de type P75S20C5 avec une brique en terre cuite par rapport aux autres liants papiers.

II.3. Sur le plan environnemental :

La maîtrise des impacts environnementaux est actuellement un objectif capital au niveau de la gestion des activités industrielles. Il en va d'ailleurs de même au niveau des collectivités locales qui ont en charge les conséquences environnementales des multiples activités liées à la vie.

II.3.1 Evaluation environnementale sur une brique en terre cuite :

Les briques sont obtenues par cuisson (en utilisant la balle de paddy, bois…) de certaines argiles à une température environ 900 à 1000 °C. Par combinaison chimique à partir de 700 C°, l'argile en perdant son eau, se transforme en terre cuite. L'oxyde de fer des argiles donne la coloration aux briques.

a) Procédé de fabrication d'une brique en terre cuite :

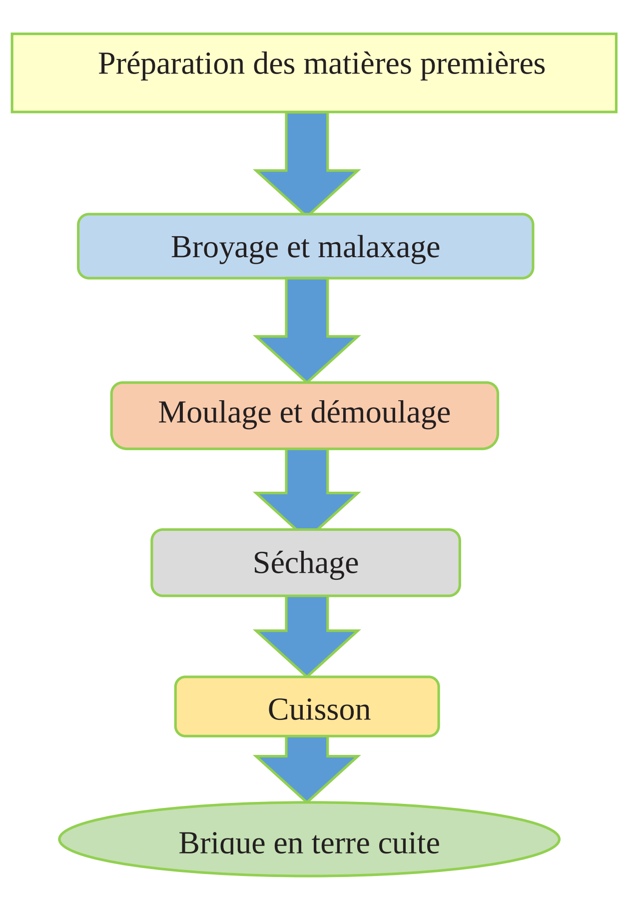


Figure 35 : procédé pour l'obtention d'une brique en terre cuite

b) Données obtenues à partir de GEMIS

Définition Analyse de cycle de vie et une unité fonctionnelle :

Une Analyse de Cycle de Vie est la compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie.

Une unité fonctionnelle : performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse de cycle de vie.

Le logiciel GEMIS qui est employé dans l'Analyse du Cycle de Vie nous donne les données de bases suivantes pour une unité fonctionnelle 1Kg de brique.

Emissions aériennes

Tableau 37 : résultat des émissions aériennes

Equivalent SO_2	$1,3481*10^{-3}$ Kg
NO_x	$1,0000*10^{-3}$ Kg
Poussière	$500,00*10^{-6}$ Kg
CO	$1,0000*10^{-3}$ Kg

Source : Auteur

Gaz à effet de serre (GES)

Tableau 38 : résultat de gaz à effet de serre

Equivalent CO_2	$312,50*10^{-3}$ Kg
CH_4	$500,00*10^{-6}$ Kg

Source : Auteur

II.3.2 Evaluation environnementale du liant papier

Nous avons vu que le procédé de fabrication du matériau à base de la pâte de papier est un procédé à froid c'est-à-dire un procédé sans cuisson (cuisson : responsable de l'émission de gaz à effet de serre) pour produire le matériau. Nous avons utilisé la pâte de papier issue du recyclage des déchets papier-carton comme matière première dans la mise en œuvre du liant papier.

II.3.3 interprétation

Au lieu d'incinérer une tonne de déchets papier-carton, nous les avons transformés pour confectionner 1000 briques à base de la pâte de papier (liant papier). Donc il y a déjà une réduction des émissions de dioxyde de carbone dans l'air. Ainsi, la valorisation des déchets papier-carton contribue à la réduction de la pollution de notre environnement.

Par contre, la production de 1000 briques en terre cuite de masse 1Kg, il existe 312,50 Kg de gaz à effet de serre. En effet, la production des briques en terre cuite détruit l'environnement.

Chapitre 12 : APPROXIMATION DE LA FORMULE DE RESISTANCE A LA COMPRESSION PAR EXCEL ET MATLAB

Le but dans ce dernier chapitre est de donner une approximation de la formule de DREUX GORISSE en utilisant Excel et Matlab. Nous avons utilisé le liant papier à base de la pâte de papier journaux car il nous donne la résistance à la compression optimale lors des essais de caractérisation des matériaux.

Le tableau ci-dessous résume la résistance à la compression du liant papier optimale pendant les études expérimentales et l'eau de gâchage lors de la mise en œuvre du matériau.

Tableau 39 : résistance à la compression optimale et le rapport C/E

Désignation	dosage en ciment [Kg/m^3]	dosage en eau [Kg/m^3]	Rc en [MPa]	C/E
P75S20C5J1	445,65	75	3,07	0,17
P70S20C10J2	478,26	150	5,26	0,31
P65S20C15J3	504,35	225	6,5	0,44
P60S20C20J4	543,48	300	8,21	0,55

Source : Auteur

I. Méthode en utilisant Excel

Nous avons tracé la courbe de la résistance à la compression en fonction du rapport entre les dosages en ciment et eau(C/E). Elle est représentée par la figure ci-dessous en affichant la courbe de tendance.

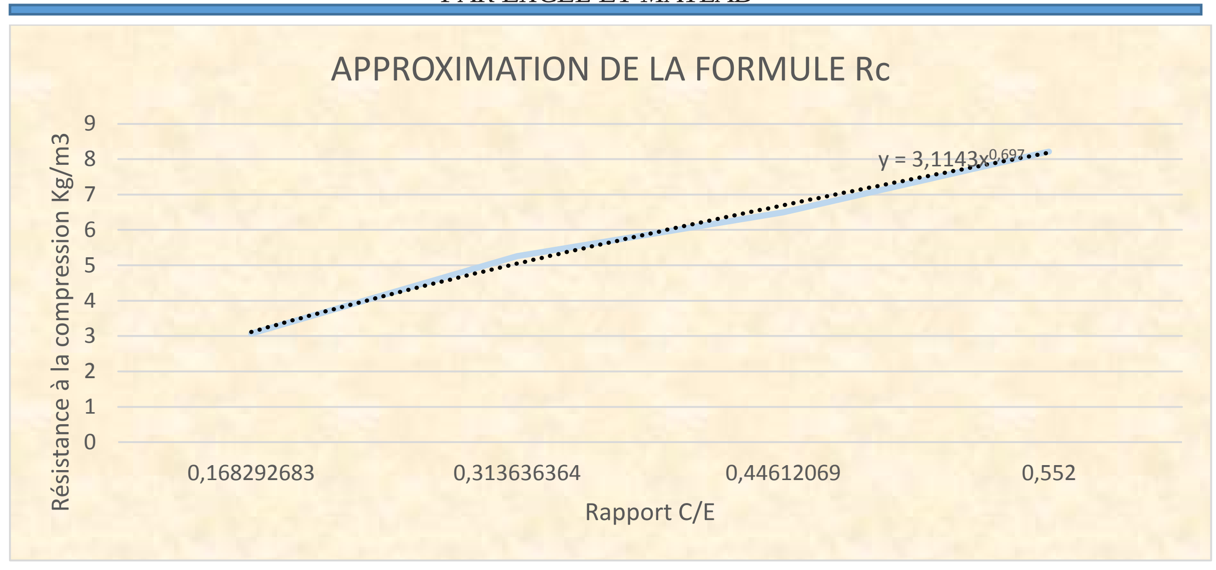


Figure 36: courbe de la Rc optimale en fonction de C/E et courbe de tendance

D'après la figure numéro 36, nous avons une courbe de tendance d'équation :

$y=3,1143*(x)^{0,697}$

Avec Rc=y et C/E=x

Donc $Rc = 3,1143*(C/E)^{0,697}$

II. Méthode 2 : Matlab

Nous avons utilisé la formule de DREUX GORISSE pour qu'elle soit applicable dans l'étude du liant papier. Ainsi, nous avons introduit cette formule sous une forme de programmation dans le Matlab.

Rc=Fc.G.(C/E- 0,5)

Rc: résistance visée à 28 jours

C: dosage en ciment en kg/m^3 de béton

E: dosage en eau en kg/m^3 de béton

Fc: classe vraie du ciment en MPa

G : coefficient granulaire

Dans cette étude nous n'avons pas utilisé les constants Fc et G. ils sont considérés dans cette méthode comme inconnue. Les résultats de mesures de la résistance à la compression et le rapport entre ciment / eau expérimental sont indispensables dans cette méthode.

Nous avons introduit les paramètres Rc et C/E obtenus expérimentalement sous une forme matricielle et la formule Rc=Fc.G.(C/E- 0,5) avec k=Fc*G est constant qu'il faut déterminer.

Après le lancement s'il n'y a pas des erreurs de frappe, Matlab construit le point Rc en fonction de C/E dans une fenêtre bien définie. Pour choisir l'une des 2 méthodes dans l'étude bibliographique, il suffit de pousser sur un bouton pour lancer le programme.

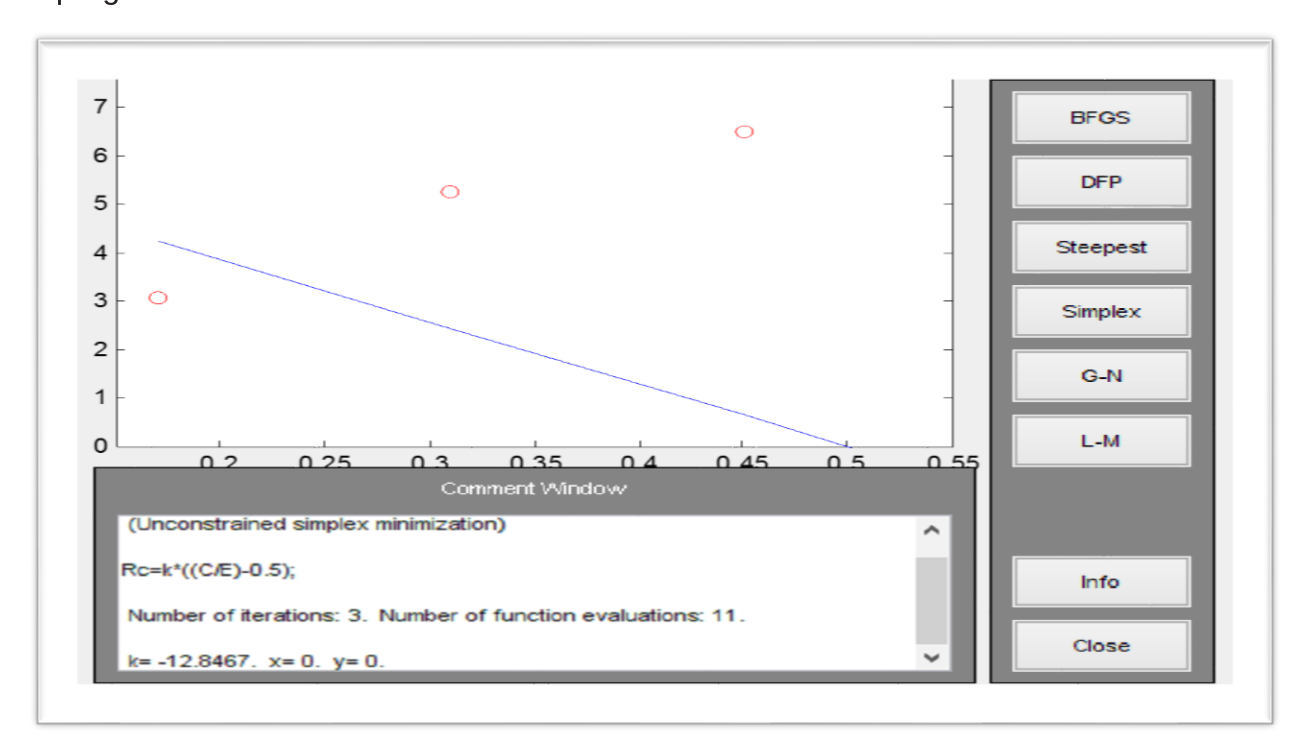


Figure 37: fenêtre dans la programmation

Le résultat obtenu est k=-12,84. Ce qui explique l'utilisation en excès d'eau dans l'étude expérimentale c'est-à-dire dans la mise en œuvre de matériau(le rapport C/E est inférieur à 0,5).

La formule devient :

Rc=-12,84*(C/E-0,5)

En remplaçant le rapport C/E par ces valeurs, nous avons le tableau ci- dessous :

Tableau 40 : valeur de Rc obtenue

C/E	Rc [MPa]	Observation
0,17	4,2	Positive
0,31	2,4	Positive
0,44	0,7	Positive
0,55	-0,7	Négative

Source : Auteur

Ce tableau nous montre qu'il n y a pas une approximation entre la valeur de la résistance à la compression expérimentale et la formule obtenue lors de l'optimisation. Ainsi, nous devons faire une approximation de la formule qui est applicable dans notre étude.

Le principe est d'additionner toutes les valeurs positive de la résistance à la compression dans le tableau numéro 39. Après, nous avons soustrait la résistance à la compression par la valeur de la somme obtenue.

La formule finale est donc:

Rc=7,34+12,84*(C/E-0,5)

Rc = 12,84*(C/E) – 0,92

Cette formule n'est valable que dans l'optimisation de la résistance à la compression du liant papier à base de la pâte de papier journaux. S'il est nécessaire de déterminer la formule de Rc pour le liant papier à base de papier vélin et carton, nous devons écrire la résistance à la compression, le rapport C/E dans matlab et suivre la même démarche que ci-dessus.

CONCLUSION

CONCLUSION GENERALE

Le présent mémoire ayant comme thème « CONTRIBUTION A LA VALORISATION DES DECHETS PAPIER-CARTON : PARAMETRAGE D’UNE MACHINE A BROYER POUR L’OBTENTION DU LIANT PAPIER » avait pour objectif de réduire les déchets papier-carton en les transformant pour produire du liant papier. Ce travail nous a montré l'intérêt que présente la valorisation des déchets papier-carton dans notre pays. Ainsi, l’élaboration de ce mémoire nous a permis d’acquérir des connaissances approfondies et du savoir-faire dans le domaine technique.

Tout au long de cet ouvrage, nous pouvons dire que grâce à la nouvelle technologie et aux appareils utilisés dans l’expérimentation tels que la machine à broyer; la machine à presse; variateur de fréquence et analyseur de réseaux, nous avons pu atteindre l’objectif principale de notre étude. Nous avons maitrisé parfaitement le fonctionnement de ces appareils et plus particulièrement la maitrise du processus de l’obtention du liant papier.

En premier lieu, nous avons utilisé les déchets papier-carton comme l’un des matières premières dans la fabrication du liant papier. Après le broyage des déchets par la machine à broyer, nous avons obtenu de la pâte de papier qui est utilisée comme constituant principal du liant papier. Afin de rendre rationnel le processus d’obtention de la pâte de papier, il est indispensable de faire intervenir plusieurs paramètres dans le processus. En effet, nous avons constaté que le mouillage à 3heures et le déchiquetage sont des paramètres très important qu’il ne faut pas négliger pour avoir de la pâte de papier uniforme et homogène.

Ensuite, nous avons confectionné du liant papier qui est un matériau composite à base de pâte de papier, du ciment et du sable. Après 28 jours de séchage, nous avons caractérisé le liant papier. L’analyse et l’exploitation des données nous ont montré que la masse volumique du liant papier est inversement proportionnelle au pourcentage de la pâte de papier. Nous avons constaté aussi que la résistance à la compression, la résistance par flexion sont optimales entre 20% et 30% de sable et elles augmentent en fonction du pourcentage de ciment. En plus, le liant papier à base de la pâte de papier journaux présente des avantages sur les résistances

mécanique par rapport aux autres liants papier à base de la pâte de papier vélin et carton.

Enfin, la méthodologie apportée par cette étude est applicable partout à Madagascar car celle-ci assure non seulement à la contribution importante au développement économique de notre pays mais participe aussi à la réduction des déchets papier-carton c'est-à-dire réduire les impacts négatifs sur le plan environnementale.

BIBLIOGRAPHIE

[1] RochetteJeanPaul, *Le bois : sa structure, ses propriétés, ses utilisations*, Éditions Dunod, 1964

[2] C. Hazard, J.-P. Barette et J. Mayer, *Mémotech Bois et Matériaux Associés*, Paris, Éditions Casteilla, 1996 (ISBN 27135-1645-5)

[3] http://www.lepapier.fr/bois_papier.htm fevrier2014

[4] B. Philipp, D. Klemm, T. Heinze, U. Heinze et W. Wagenknecht, Comprehensive Cellulose Chemistry éditions Wiley-VCH 1998.

[5] Danielle Elisseeff, *Art et archéologie : la Chine du néolithique à la fin des Cinq Dynasties (960 de notre ère)*, Paris, École du Louvre, Éditions de la Réunion des Musées Nationaux (Manuels de l'École du Louvre), 2008, 381 p. (ISBN 978-2-7118-5269-7)

[6] Fahr-Becker Gabriele (sous la direction de), *Les Arts de l'Asie orientale. Tome 1*, Cologne, Könemann, 1999, 406 p. (ISBN 3-8290-1743-X)

[7] Tatrai E, Adamis Z, Bohm U et al – Role of cellulose in wood dust-induced fibrosing alveo-bronchiolitis in rat.J, Appl. Toxicol. 1995;15(1): 45-48

[8] GalezPhilippe - Mesures Physiques Annecy –- 2011 – Polymères et composites

[9] Cours des matériaux composites en 4ème et 5ème année Monsieur RANARIVELO Michel Maitre de conférence au sein du département SMM de l'ESPA

[10] Cours du ciment en 3ème année et béton en 4ème année Monsieur RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely professeur titulaire au sein du département SMM

[11] Cours de la Recherche Opérationnelle en 4ème année Monsieur RANAIVOSON Andriambala Maitre de conférence au sein du département SMM de l'ESPA

[12] Cours de MATLAB 5 ème année Monsieur RASOANOAVY Faliniaina Maitre de conférence au sein du département SMM de l'ESPA

ANNEXES

ANNEXE I : NORMALISATIONS DES CIMENTS

Les normes ASTM :

- Les ciments Portland : les ciments Portland reposent principalement sur la norme « ASTM C 150 : associée à différentes méthodes et spécifications de mesures.

Norme ASTM C 15O - Spécifications pour les ciments Portland

Norme ASTM C 15O - Spécifications pour les ciments Portland	Usage général
Type I Type II Type III Type IV Type V	Chaleur d'hydratation et résistance aux sulfates modérées Résistance initiale élevée Faible chaleur d'hydratation Résistance aux sulfates élevée
A LA	Avec entraîneur d'air Faible teneur en alcalis

- Les ciments composés : Les ciments composés sont caractérisés par les teneurs des constituants principaux. On distingue 6 types de ciments

Norme ASTM C 595 - Spécifications pour les ciments composés

Types	Composition
Type S Type IS Type I (SM) Type P Type IP Type I (PM)	Ciment au laitier avec un minimum de 70 % de laitier Ciment de haut fourneau avec 25 à 70 % de laitier Ciment Portland au laitier contenant moins de 25 % de laitier Ciment à la pouzzolane avec 15 à 40 % de pouzzolane Ciment à la pouzzolane avec 15 à 40 % de pouzzolane, mais avec un développement de résistance plus fort que le type P Ciment Portland à la pouzzolane contenant moins de 15 % de pouzzolane

La norme européenne EN 197-1

La norme européenne EN 197-1 est publiée par l'AFNOR sous la référence NF EN 197-1. Un mode de classification des ciments le plus utilisé est la classification suivant les résistances mécanique, et plus exactement la résistance à la compression simple.

Selon cette norme NF EN 197-1, les ciments sont répartis en trois classes : 32,5, 42,5 et 52,5, définies par la valeur minimale garantie de la résistance normale du ciment à 28 jours. La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression simple mesurée à 28 jours sur mortier normal conformément à la norme NF EN 196-1 et exprimée en MPa.

Classes de résistance des ciments

Désignation de la classe	Classes de résistance Résistance à la compression [MPa]		
	à 2 jours	à 28 jours	
	limite inférieure	limite inférieure	limite supérieure
32,5 N 32,5 R	- ≥ 10	≥ 32,5	≤ 52,5
42,5 N 42,5 R	≥ 10 ≥ 20	≥ 42,5	≤ 62,5
52,5 N 52,5 R	≥ 20 ≥ 30	≥ 52,5	-
• Sous classe N : Normale • Sous classe R : Résistance au jeune âge élevée			

Les ciments de la norme NF EN 197-1 : Ciments courants

Les ciments de la norme NF EN 197-1 sont définis comme ciments courants à l'instar des autres ciments plus spécifiques, dans la composition, la fabrication et/ou l'utilisation.

Selon la nature et la proportion des constituants, les ciments courants sont répartis dans 11 familles et dans 27 sous types, comme l'indique le tableau suivant

Dénomination, symbole et composition des différents types de ciments de la norme NF EN 197-1

Types	Notation	Composition en % en masse (1)			
	Dénomination	Symbole(2)	Clinker	Constituants principaux	Constituants secondaires
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	0	0-5
CEM II	Ciment portland au laitier	CEM II/A – S	80 – 94	6 – 20	0-5
		CEM II/B – S	65 – 79	21 – 35	0-5
	Ciment Portland à la fumée de silice (3)	CEM II/A – D	90 – 94	6 – 10	0-5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A – P	80 – 94	6 – 20	0-5
		CEM II/B – P	65 – 79	21 – 35	0-5
		CEM II/A – Q	80 – 94	6 – 20	0-5
		CEM II/B – Q	65 – 79	21 – 35	0-5
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A – V	80 – 94	6 – 20	0-5
		CEM II/B – V	65 – 79	21 – 35	0-5
		CEM II/A – W	80 – 94	6 – 20	0-5
		CEM II/B – W	65 – 79	21 – 35	0-5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A – T	80 – 94	6 – 20	0-5
		CEM II/B – T	65 – 79	21 – 35	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A – L	80 – 94	6 – 20	0-5
		CEM II/B – L	65 – 79	21 – 35	0-5
		CEM II/A – LL	80 – 94	6 – 20	0-5
		CEM II/B – LL	65 – 79	21 – 35	0-5
	Ciment Portland composé (4) (5)	CEM II/A – M	80 – 94	6 – 20	0-5
		CEM II/B – M	65 – 79	21 – 35	0-5
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35 – 64	36 – 65	0-5
		CEM III/B	20 – 34	66 – 80	0-5
		CEM III/C	5 – 19	81 – 95	0-5
		CEM IV/A	65 – 90	11 – 35	0-5
CEM IV	Ciment pouzzolanique (5)(7)	CEM IV/B	45 – 64	36 – 55	0-5
CEM V	Ciment composé (5)	CEM V/A	40 – 64	36 – 60	0-5
		CEM V/B	20 – 39	61 – 80	0-5

(1) : Les valeurs données se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires

(2) : Signification des lettres :

• A, B ou C pour indiquer l’importance de la proportion des constituants

• M pour signaler qu'on a au moins 2 constituants principaux

• Désignation des constituants principaux :

- S : Laitier de haut fourneau - D : Fumée de silice - P : Pouzzolane naturelle

- Q : Pouzzolane naturelle calcinée - V : Cendres volantes siliceuses

- W : Cendres volantes calciques - T : Schiste calciné

- L : Calcaire - LL : Calcaire

(3) : La proportion de fumée de silice est limitée à 10 %

(4) : Présence de plusieurs constituants principaux à différentes proportions

(5) : Les constituants principaux sont indiqués dans la désignation du ciment : symbole entre parenthèses

(6) : Le laitier de haut fourneau est le seul principal ajout au clinker

(7) : Les principaux ajouts sont de la fumée de silice, de la pouzzolane naturelle et de la cendre volante.

ANNEXEII : ANALYSE CHIMIQUE DES CIMENTS

Les modes opératoires de l'analyse chimique du ciment sont les suivants :

Peser 1g de ciment

Ajouter 2g de Na_2O_2

Bien mélangé avec une spatule, remettre dans le mélange les parties adhérentes en nettoyant la spatule

Couvrir le mélange avec environ de 1g de Na_2O_2

Laisser 2min environ à l'entrée du four régler à 500+/-10°C

Déposer le creuset au milieu du four pendant 40min à 500°C

Sortir le creuset et laisser refroidir à température ambiante : la masse frittée ne doit pas coller aux parois si non recommencer et porter le four à 490°C.transvaser la masse frittée dans un bécher de 400ml

Rincer le creuset avec 150 ml d'eau distillée froide

Couvrir d'un verre de montre et chauffer jusqu'à dissolution complète du solide

Ajouter avec précaution 50ml d'HCl concentré

La solution obtenue doit être limpide si non recommencer l'attaque en augmentant la température du four de 10°C

Ajouter 1ml d'acide sulfurique dilué

Chauffer jusqu'à l'ébullition et laisser bouillir pendant 30min

Double insolubilisation :

Prendre la solution obtenue après attaque

Evaporer à sec sur une plaque chauffante à 105+/-3°C

Humecter avec quelques gouttes de HCl concentré et laisser pendant 1heure à 105°C

Après refroidissement, ajouter 10ml d'HCl concentré et laisser agir quelques minutes

Diluer avec 50ml d'eau distillée, porter à l'ébullition

Filtrer à chaud sur papier filtre moyen dans une fiole 500ml

Faire évaporer le filtrat obtenu dans les mêmes conditions que précédemment

Reprendre avec 10ml d'HCl concentré puis ajouter de l'eau distillée et faire bouillir

Filtrer sur même papier filtre dans une fiole jaugée de 500 ml.

Détermination de la silice :

Peser le creuset en platine : soit m

Mettre le papier filtre et son contenu dans le creuset

Calciner à 1175+/-25°C pendant 45min

Laisser refroidir dans un dessiccateur

Peser la constance de la masse, soit m' :

Expression des résultats :

%SiO_2= (m'-m)*100

m : masse vide de creuset

m' : masse de creuset +contenu après calcination

<u>Détermination de Fe_2O_3 :</u>

Pipeter 100ml de filtrat et ajouter 200ml d'ED

Ajouter 0,5g d'acide amino-acetique et 0,3g d'indicateur sulfosalycilique

Ajuster à ph 1,5+/-0,1 par ajout de NH_2OH

Chauffer à 47,5 +/-25°C(ne jamais dépasser à 80°C

Ajouter 2ml H2SO4 pour masquer l'oxyde de titane

Titrer avec EDTA 0,03mol/l jusqu'à virage jaune paille noté V

Expression des résultats :

%Fe_2O_3= V*f_{EDTA}/ Fe_2O_3

<u>Détermination d'Al_2O_3</u>

Prendre la solution ayant servi au dosage de Fe_2O_3 et le refroidir

Ajouter 5ml d'acide acétique

Ajuster le pH à 3,05+/-0,05 sans dépasser à 3,1 si non à refaire l'analyse

Porter à l'ébullition

Ajouter 3 gouttes de complexonate de cuivre et 10 gouttes de PAN

Titrer avec EDTA 0,03 mol/l en maintenant à l'ébullition jusqu'au virage jaune paille persiste pendant une minute noté V

Expression des résultats :

%Al_2O_3=V*f_{EDTA}/ Al_2O_3

<u>Détermination de CaCO</u>

Prendre 50ml du filtrat et ajouter 200ml d'H_2O

Ajouter 50ml de la solution de triethanolamine

Ajouter au pH 12,5 par ajout de NaOH 160g/l

Ajouter 0,1g environ de

Titrer avec EDTA 0,03mol/l jusqu'à obtention du couleur bleu noter V

Expression des résultats :

$\%CaO=V*f_{EDTA}/CaO$

Démarche pour le calcul des modules, valeurs requises et les compositions minéralogiques potentielles du ciment :

Chaux de saturation

C'est la quantité maximale de chaux qui peut être fixée par les constituants acides (SiO_2, Al_2O_3 et Fe_2O_3) contenus dans le mélange.

On a l'expression de la chaux de saturation :

$CaOsat = 2,80SiO_2 + 1,65Al_2O_3 + 0,35Fe_2O_3$ (mélange normal)

$CaOsat = 2,80SiO_2 + 1,10Al_2O_3 + 0,70Fe_2O_3$ **(**mélange riche en fer**)**

Modules et valeurs requises

• le module de chaux MC ;

• le module de silice MS ;

• le module d'alumine ou module oxydique MA.

Module de chaux MC

C'est le rapport exprimé en pourcentage de la teneur en chaux du mélange sur la chaux de saturation :

MC = $\mathbf{CaO * 100 / CaOsat}$

• Si MC = 100, le mélange contient exactement la quantité de chaux qui peut être fixée par SiO_2, Al_2O_3 et Fe_2O_3 contenus dans ce mélange ;

• Si MC > 100, il existe forcément de la chaux libre, non combinée, dans le mélange

Module de silice MS

Il renseigne sur le rapport entre la quantité de silicates et celle d'aluminates contenus dans le ciment ou le clinker.

$MS = SiO_2/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$

Module d'alumine (ou oxydique) MA

$MA = Al_2O_3/Fe_2O_3$

• Si MA > 0,638, le ciment est normal et contient du C_3A et du C_4AF ;

• Si MA < 0,638, le ciment est dit **« riche en fer »** et contient du C2F au lieu de C3A.

Formule de BOGUE :

Quantité insuffisante de chaux : MC < 90

Système C_2S – C_3A – C_5F_3 – C_4AF (C_2S ne peut pas se transformer en C_3S)

$C_2S = 2,87\ SiO_2$

$C_3A = 3,61\ CaO – 6,74\ SiO_2 – 3,81\ Al_2O_3 – 2,96\ Fe_2O_3$

$C_5A_3 = 4,88\ SiO_2 + 4,31\ Al_2O_3 + 0,92\ Fe_2O_3 – 2,61\ CaO$

$C_4AF = 3,04\ Fe_2O_3$

Quantité suffisante de chaux mais sans excès: 90 < MC < 100

Système C_3S – C_2S – C_3A – C_4AF (Théoriquement il n'y a pas de chaux libre)

$C_3S = 4,07\ CaO – 7,61\ SiO_2 – 6,72\ Al_2O_3 – 1,43\ Fe_2O_3$

$C_2S = 2,87\ SiO_2 – 0,75\ C_3S$

$C_3A = 2,65\ Al_2O_3 – 1,69\ Fe_2O_3$

$C_4AF = 3,04\ Fe_2O_3$

Excès de chaux : MC > 100

Système CaO – C_3S – C_3A – C_4AF (Théoriquement tout C_2S est transformé en C_3S, et il ya existence de chaux libre)

$C_3S = 3,80\ SiO_2$

$C_3A = 2,65\ Al_2O_3 – 1,69\ Fe_2O_3$

$C_4AF = 3,04\ Fe_2O_3$

CaOL = CaO – CaOsat

Quantité suffisante de chaux, mais mélange « riche en fer »: 90 < MC < 100 et MA < 0,638

Système C_3S – C_2S – C_2F – C_4AF (Théoriquement il n'ya pas de chaux libre)

$C_3S = 4,07\ CaO – 7,61\ SiO2 – 4,48\ Al_2O_3 – 2,86\ Fe_2O_3$

$C_2S = 2,87\ SiO_2 – 0,75\ C_3S$

$C_2F = 1,70\ Fe_2O_3 – 2,67\ Al_2O_3$

$C_4AF = 4,77\ Al_2O_3$

Détermination des modules et valeurs requises :

Module d’alumine (ou oxydique) MA

MA=5,8/3,1=1,87

le ciment est normal et contient du C_3A et du C_4AF car MA > 0,638

Module de silice MS :

MS=20,2/ (3,1+5,8)

MS=2,27

Chaux de saturation

CaOsat = 2,80SiO_2 + 1,65Al_2O_3 + 0,35Fe_2O_3 (mélange normal)

CaOsat =2,80*20,2 + 1,65*5,8 + 0,35*3,1

CaOsat =67,2

Module de chaux MC

MC=62,21*100/67,2

MC=92,55

Comme 90 < MC < 100 donc la formule de bogue est :

C_3S = 4,07*CaO – 7,61*SiO_2 – 6,72*Al_2O_3 – 1,43*Fe_2O_3

C_3S=4,07*62,21 – 7,61 20,2 – 6,72*5,8 – 1,43*3,1

C_3S =56,06

C_2S = 2,87 SiO_2 – 0,75 C_3S

C_2S=2,87*20,2 – 0,75*56,06

C_2S =15,93

C_3A = 2,65 Al_2O_3 – 1,69 Fe_2O_3

C_3A = 2,65*5,8 – 1,69*3,1

C_3A =10,13

ANNEXE III : CODE DE MATLAB

```
fonctionOPTIMGLOBAL (action)
Global N y
N = [0.17 0.31 0.45 0.55]';
y = [3.07 5.26 6.5 8.21]';
%===================================
Information for all buttons
   labelColor=[0.8 0.8 0.8];
   top=0.95;
```

```
left=0.80;
btnWid=0.15;
btnHt=0.08;
% Spacing between the button and the next command's label
spacing=0.02;
%====================================
% The CONSOLE frame
frmBorder=0.02;
yPos=0.05-frmBorder;
frmPos=[left-frmBorder yPos btnWid+2*frmBorder 0.9+2*frmBorder];
uicontrol( ...
   'Style','frame',...
   'Units','normalized',...
   'Position',frmPos, ...
   'BackgroundColor',[0.5 0.5 0.5]);
%====================================
% The SIMPLEX button
btnNumber=4;
yPos=top-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
labelStr='Simplex';
callbackStr='OPTIMGLOBAL(''demobutton'')';
btnPos=[left yPos-btnHt btnWid btnHt];
uicontrol( ...
   'Style',’pushbutton’...
   'Units',’normalized’...
   'Position',btnPos, ...
   'String',labelStr, ...
   'Callback',callbackStr, ...
   'UserData',btnNumber);
%====================================
% The LEVENBERG-MARQUARDT button
btnNumber=6;
yPos=top-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
labelStr='L-M';
```

```
    callbackStr='OPTIMGLOBAL(''demobutton'')';
    % Generic popup button information
    btnPos=[left yPos-btnHt btnWid btnHt];
    uicontrol( ...
      'Style',’pushbutton’,
      'Units',’normalized’...
      'Position',btnPos, ...
      'String',labelStr, ...
      'Callback',callbackStr, ...
      'UserData',btnNumber);
    %====================================
if method==1,
      str= ...
         [' Nelder-Mead                              '
         ' (Unconstrained simplex minimization)'];
set(txtHndl,'String',str);
str2='Rc=k*((C/E)-0.5);';
 start = x;
     OPTIONS = optimset(OPTIONS,'MaxFunEvals',200);
     f=@(x)errorcalcul(x,N,y);
     [xfinal,fval,exitflag,output] = fminsearch(f,start,OPTIONS);
k = kcalcul(xfinal,N,y);
elseif method==2,
      str= ...
         [' Levenberg-Marquardt           '
         ' (Least squares minimization) '];
      set(txtHndl,'String',str);
OPTIONS =
optimset(OPTIONS,'LevenbergMarq','on','MaxFunEvals',200,'Jacobian','on');
JAC=@(x) JACS(x,N,y);
      f= @(x) MYFUN(x,N,y);
      str2='[x,resnorm,residual,exitflag,output]= lsqnonlin({f,JAC},x,[],[],OPTIONS);';
      [xfinal,resnorm,residual,exitflag,output]= lsqnonlin({f,JAC},x,[],[],OPTIONS);
k = kcalcul(xfinal,N,y);
```

```
fval = resnorm;
End;
   funEvals=sprintf(' Number of iterations: %g.  Number of function evaluations: 
%g.', output.iterations, output.funcCount);
   funEvals1=sprintf(' k= %g.  x= %g.  y= %g.',k, xfinal(1), xfinal(2)); %A masquer si 
fonction BANANA
str=get(txtHndl,'String');
   %str=str2mat(str,' ',str2,' ',funEvals);
   str=str2mat(str,' ',str2,' ',funEvals,' ',funEvals1);
   set(txtHndl,'String',str);
   %==================================
function stop = OPTIMGLOBALOutFcn(x,optimvalues,state,userdata,varargin)
global N y
 stop = false;
if strcmp(state,'iter')
 A = zeros(length(N),1);
 for j = 1:length(N)
   %A(j,1) = ((k1*N(j))^x(1))*((k2*(N(j)^2))^x(2));
   A(j,1) = (N(j)-0.5);
 end
 c = A\y;
 z = A*c;
 %plot(N,y,'ro');
 cla reset;
 plotbananamod;
 %handle = plot(N,y,'b');
 plot(N,z,'b');
 %ylim([0 300]);
ylim([0 10])
```

TABLE DES MATIERES

Titre : CONTRIBUTION A LA VALORISATION DES DECHETS PAPIER-CARTON : PARAMETRAGE D'UNE MACHINE A BROYER POUR L'OBTENTION DU LIANT PAPIER

Auteur : RANDRIAMALALA Helifiononana Elodie

Nombre de pages: 103

Nombre de figures : 37

nombre de photos : 05

Nombre de tableaux : 41

Nombre d'annexes : 4

RESUME : La valorisation des déchets papier-carton a été le but principal dans cette étude. Une étude détaillée du processus d'obtention de la pâte de papier et du liant papier a été effectuée dans cet ouvrage. Dans un premier lieu, nous avons déterminé les étapes de la fabrication de la pâte de papier en intervenant plusieurs paramètres et de la nouvelle technologie (machine à broyer). Dans le second lieu, nous avons confectionné le liant papier qui est un matériau provenant du mélange de la pâte de papier, de sable et du ciment. La mise en œuvre du liant papier a été facilitée en utilisant de la machine à presse. Après 28 jours de séchage, les caractérisations de ce matériau ont été réalisées au laboratoire.

Mots clés : procédés, pâte de papier, liant papier, caractérisation du matériau

SUMMARY : The valorization of waste paper-cardboard was the principal goal in this study. A detailed study of the process of obtaining the paper dough and papercrete were realezed in this work. In a first place, we determined the stages for the production of the paper dough while intervening several parameters and new technology (crushing machine). In the second place, we made the papercrete which is a material coming from the mixture of the paper dough , sand and cement. The implementation of the papercrete was facilitated by using press machine. After 28 days of drying, the characterizations of this material were carried out at the laboratory.

Key words : process, paper dough, papercrete, characterization of material

Rapporteurs : Monsieur RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely, Professeur Titulaire

Monsieur ANDRIAMANAMPISOA Tsiry Angelos

Coordonnées :

Adresse : 505 L 225 Mahafaly (ANTSIRABE)

Contact : 0328216775

E-mail :didihelifiononana@gmail.com